

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Curso de Especialização em Engenharia de Estruturas

Lídia de Paula Martins

**ESTUDO COMPARATIVO: DIMENSIONAMENTO DE BARRAS COMPRIMIDAS
EM PERFIS H SOLDADOS UTILIZANDO A ABNT NBR 8800:2008 E A PROPOSTA
DE REVISÃO**

Belo Horizonte

2022

Lídia de Paula Martins

**ESTUDO COMPARATIVO: DIMENSIONAMENTO DE BARRAS COMPRIMIDAS
EM PERFIS H SOLDADOS UTILIZANDO A ABNT NBR 8800:2008 E A PROPOSTA
DE REVISÃO**

Versão final

Monografia de Especialização defendida perante a banca examinadora, como parte dos requisitos necessários à aprovação na disciplina Trabalho Final de Curso do Curso de Especialização em Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Barreto Caldas

Belo Horizonte

2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA / TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

Aos **sete** dias do mês de **novembro** de **2022**, às 18h, a estudante Lídia de Paula Martins, matrícula 2019703380, defendeu o Trabalho intitulado “**Estudo comparativo: Dimensionamento de barras comprimidas em perfis H soldados utilizando a ABNT NBR 8800:2008 e a proposta de revisão**”.

Participaram da banca examinadora os abaixo indicados, que, por nada mais terem a declarar; assinam eletronicamente a presente ata.

Nota: 90 (noventa pontos)

Orientador(a): Prof. Rodrigo Barreto Caldas

Nota: 90 (noventa pontos)

Examinador(a): Prof. Ricardo Hallal Fakury



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Barreto Caldas, Professor do Magistério Superior**, em 07/12/2022, às 13:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Hallal Fakury, Professor do Magistério Superior**, em 08/12/2022, às 09:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1946773** e o código CRC **5D7ABCDE**.

Este documento deve ser editado apenas pelo Orientador e deve ser assinado eletronicamente por todos os membros da banca.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Hermínio e Samara, e a minha irmã Luciana, pelo apoio incondicional e presença constante, sempre incentivando a seguir os meus sonhos e a superar as minhas expectativas.

Ao Professor Rodrigo Barreto Caldas pela orientação ao longo do curso e por compartilhar seus conhecimentos, contribuindo na formação acadêmica e crescimento profissional.

Aos professores, desde a infância até a especialização, por compartilharem seus conhecimentos teóricos, práticos e experiências de vida. A participação de todos será sempre lembrada com carinho.

RESUMO

Atualmente, a norma brasileira voltada para o projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios, a ABNT NBR 8800:2008, encontra-se em processo de revisão. Portanto, inicia-se esta pesquisa com um breve histórico da aplicação do aço na construção civil e um resumo dos trabalhos de revisão da norma brasileira. Em seguida, compara-se a ABNT NBR 8800:2008 e o PR NBR 8800:2022 com o intuito de mapear as alterações que influenciam no dimensionamento de elementos de aço, e constata-se que as mudanças significativas ocorrem para barras submetidas à força axial de compressão, sendo que as novas equações são aplicáveis, sem distinção, para perfis laminados e soldados com dupla simetria. Identificam-se as principais modificações propostas pelo PR NBR 8800:2022 e destacam-se as informações conforme a ordem dos conteúdos do projeto de revisão. A partir destes dados, foram elaboradas planilhas eletrônicas para a obtenção da força axial de compressão resistente de cálculo de perfis soldados com dupla simetria. Após esta etapa, testam-se seções transversais em ambas planilhas com o objetivo de verificar o efeito das variações entre os equacionamentos da norma vigente e do projeto de revisão. Em sequência, plotam-se gráficos comparativos com os resultados obtidos. Por fim, nota-se que o projeto de revisão afeta o dimensionamento de elementos estruturais comprimidos devido à alteração no procedimento de cálculo, sobretudo na verificação da instabilidade local. Salienta-se que este trabalho é importante para os profissionais que buscam entender como o projeto de revisão afeta o dimensionamento dos elementos estruturais de aço.

Palavras-chave: Estruturas de aço. Norma brasileira. Projeto de revisão. Perfis soldados. Barras comprimidas.

ABSTRACT

Currently, the Brazilian code for the design of steel and composite structures for buildings, ABNT NBR 8800:2008, is under revision. Therefore, this paper begins with a historical account of steel in civil construction and a summary of the review documents of the Brazilian standard. Then, ABNT NBR 8800:2008 and PR NBR 8800:2022 are compared in order to identify the changes that influence the design of steel structural elements. It is clear that significant modifications occur for members subjected to an axial compressive load, and the new equations are applicable, without distinction, for doubly symmetric wide-flange sections that are rolled or welded. The main changes proposed by PR NBR 8800:2022 are identified and the information is highlighted following the order of the contents of the review document. From these data, spreadsheets are created to calculate the design compressive strength of doubly symmetric welded sections. After this step, cross sections are tested in both spreadsheets in order to verify the effect of variations between the equations of the current standard and the review document. Next, comparative graphs are plotted with the results obtained. Finally, it is noted that the review document affects the design of compressed elements because the calculation procedure has changed, especially in checking local buckling. In addition, this research can be used by professionals who wish to examine how the review document affects the design of steel structures.

Keywords: Steel structures. Brazilian standard. Review document. Welded sections. Compressed members.

SUMÁRIO

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 1. | INTRODUÇÃO | 8 |
| 2. | OBJETIVOS | 10 |
| 3. | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 11 |
| 3.1 | HISTÓRICO DA NORMA BRASILEIRA | 11 |
| 3.2 | COMPARAÇÕES ENTRE A NORMA VIGENTE E O PROJETO DE REVISÃO | 12 |
| 3.2.1 | <i>Título</i> | 12 |
| 3.2.2 | <i>Sumário</i> | 13 |
| 3.2.3 | <i>Prefácio</i> | 14 |
| 3.2.4 | <i>Introdução</i> | 14 |
| 3.2.5 | <i>Escopo</i> | 14 |
| 3.2.6 | <i>Referências normativas</i> | 14 |
| 3.2.7 | <i>Simbologia e unidades</i> | 15 |
| 3.2.7.1 | <i>Simbologia</i> | 15 |
| 3.2.7.2 | <i>Unidades</i> | 15 |
| 3.2.8 | <i>Condições gerais de projeto</i> | 15 |
| 3.2.8.1 | <i>Generalidades</i> | 15 |
| 3.2.8.2 | <i>Desenhos de projeto</i> | 15 |
| 3.2.8.3 | <i>Desenhos de fabricação</i> | 15 |
| 3.2.8.4 | <i>Desenhos de montagem</i> | 15 |
| 3.2.8.5 | <i>Avaliação de Conformidade de Projeto</i> | 15 |
| 3.2.8.6 | <i>Materiais</i> | 16 |
| 3.2.8.7 | <i>Segurança e estados-limites</i> | 16 |
| 3.2.8.8 | <i>Ações</i> | 16 |
| 3.2.8.9 | <i>Resistências</i> | 17 |
| 3.2.8.10 | <i>Estabilidade e análise estrutural</i> | 17 |
| 3.2.8.11 | <i>Análise estrutural de vigas contínuas e semicontínuas</i> | 18 |
| 3.2.8.12 | <i>Resistência e rigidez das contenções laterais</i> | 19 |
| 3.2.8.13 | <i>Integridade estrutural</i> | 19 |
| 3.2.9 | <i>Condições específicas para o dimensionamento de elementos de aço</i> | 19 |
| 3.2.9.1 | <i>Condições gerais</i> | 19 |
| 3.2.9.2 | <i>Barras prismáticas submetidas à força axial de tração</i> | 19 |
| 3.2.9.3 | <i>Barras prismáticas submetidas à força axial de compressão</i> | 20 |
| 3.2.9.4 | <i>Barras prismáticas submetidas a momento fletor e força cortante</i> | 27 |
| 3.2.9.5 | <i>Barras prismáticas submetidas à combinação de esforços solicitantes</i> | 29 |
| 3.2.9.6 | <i>Barras de seção variável</i> | 29 |
| 3.2.9.7 | <i>Mesas e almas de perfis I e H submetidos a forças transversais localizadas</i> | 29 |
| 3.2.10 | <i>Condições específicas para o dimensionamento de ligações metálicas</i> | 30 |
| 3.2.1 | <i>Condições específicas para o dimensionamento de elementos mistos de aço e concreto</i> | 30 |
| 3.2.2 | <i>Condições específicas para o dimensionamento de ligações mistas</i> | 30 |
| 3.2.3 | <i>Considerações adicionais de dimensionamento</i> | 30 |
| 3.2.4 | <i>Condições adicionais de projeto</i> | 30 |
| 3.2.5 | <i>Estados-limites de serviço</i> | 30 |
| 3.2.6 | <i>Requisitos básicos de fabricação, montagem e controle de qualidade</i> | 30 |
| 3.2.7 | <i>Anexo A (normativo) Aços estruturais e materiais de ligação</i> | 31 |
| 3.2.8 | <i>Anexo B (normativo) Deslocamentos máximos</i> | 31 |
| 3.2.9 | <i>Anexo C (informativo) Método da amplificação dos esforços solicitantes</i> | 31 |
| 3.2.10 | <i>Anexo D (normativo) Momento fletor resistente de cálculo de vigas de alma não-esbelta</i> | 32 |
| 3.2.11 | <i>Anexo E (normativo) Momento fletor resistente de cálculo de vigas de alma esbelta</i> | 33 |
| 3.2.12 | <i>Anexo F (normativo) Aberturas em almas de vigas</i> | 33 |
| 3.2.13 | <i>Anexo G (normativo) Requisitos para barras de seção variável</i> | 34 |
| 3.2.14 | <i>Anexo H (normativo) Fadiga</i> | 34 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 3.2.15 | <i>Anexo I (normativo) Vibrações em pisos</i> | 34 |
| 3.2.16 | <i>Anexo J (normativo) Vibrações devidas ao vento</i> | 34 |
| 3.2.17 | <i>Anexo K (normativo) Durabilidade de componentes de aço frente à corrosão</i> | 34 |
| 3.2.18 | <i>Anexo L (normativo) Vigas mistas de aço e concreto</i> | 34 |
| 3.2.19 | <i>Anexos excluídos do PR NBR 8800:2022</i> | 35 |
| 3.3 | GENERALIDADES SOBRE ESTRUTURAS METÁLICAS | 35 |
| 3.3.1 | <i>Perfis metálicos e propriedades mecânicas</i> | 35 |
| 3.3.2 | <i>Elementos estruturais</i> | 36 |
| 3.3.3 | <i>Método dos estados-limites</i> | 37 |
| 3.4 | DIFERENÇAS ENTRE OS CONCEITOS DE FLAMBAGEM E INSTABILIDADE | 37 |
| 3.5 | ANÁLISE ESTRUTURAL DE SEGUNDA ORDEM | 38 |
| 3.6 | DIMENSIONAMENTO DE BARRAS PRISMÁTICAS SUBMETIDAS À FORÇA AXIAL DE COMPRESSÃO | 39 |
| 3.6.1 | <i>Procedimento de cálculo do PR NBR 8800:2022</i> | 39 |
| 3.6.2 | <i>Procedimento de cálculo da ABNT NBR 8800:2008</i> | 39 |
| 3.7 | INFLUÊNCIAS DA NORMA AMERICANA ANSI/AISC 360-16 NO PR NBR 8800:2022 PARA O DIMENSIONAMENTO DE BARRAS PRISMÁTICAS SUBMETIDAS À FORÇA AXIAL DE COMPRESSÃO | 34 |
| 4. | METODOLOGIA | 44 |
| 4.1 | CONSIDERAÇÕES INICIAIS | 44 |
| 4.2 | COMPARAÇÃO ENTRE A ABNT NBR 8800:2008 E O PR NBR 8800:2022 PARA O DIMENSIONAMENTO À COMPRESSÃO | 44 |
| 4.3 | INSTABILIDADE GLOBAL E INSTABILIDADE LOCAL | 47 |
| 5. | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 49 |
| 5.1 | COLETA DE DADOS | 49 |
| 5.2 | COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DO PR NBR 8800:2022 E DA ABNT NBR 8800:2008 | 54 |
| 5.3 | EXEMPLOS | 71 |
| 6. | CONCLUSÃO | 72 |
| 7. | BIBLIOGRAFIA | 73 |
| 8. | APÊNDICES | 76 |

1. INTRODUÇÃO

No século XVIII, iniciou-se o uso de estruturas metálicas na construção civil. Tal fato revolucionou a engenharia e contribuiu para impulsionar o desenvolvimento de sistemas construtivos estruturados em aço. Entretanto, no Brasil construções em aço começaram entre o final do século XIX e o início do século XX, conforme aponta o Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA, 2015a). De acordo com Fakury *et al.* (2016), os elementos estruturais de aço podem ser empregados como pilares, vigas, barras de contraventamento, barras de pórtico e na composição de treliças. Salienta-se que o material se comporta bem sob tensões normais de tração e compressão, embora seja suscetível a problemas de instabilidade quando submetido à compressão. A estrutura de aço é adequada às obras em que há necessidade em vencer grandes vãos, como em galpões, ou grandes alturas, como em edifícios altos. Nos casos em que as condições do solo são pouco favoráveis para a fundação, o uso é vantajoso por conferir um menor peso próprio da estrutura.

Dentre as vantagens do aço como material estrutural, Fakury *et al.* (2016) destacam o elevado índice de resistência, característica responsável por proporcionar aos elementos em aço dimensões menores do que os elementos em concreto armado; a elevada ductilidade, que confere maior resistência a impactos e contribui na redistribuição das tensões; o alto grau de confiança e conseqüente menor coeficiente de ponderação da resistência empregado no cálculo estrutural, se comparado com o considerado para o concreto armado; um canteiro de obras menor, limpo e organizado; a facilidade de reforço ou ampliação; a sustentabilidade proporcionada pela possibilidade em reciclar e reutilizar os materiais; e a rapidez de execução vinculada as peças serem pré-fabricadas e com precisão das dimensões. Contudo, enfatiza-se a importância em se tomar cuidados na utilização do aço, sobretudo quanto à corrosão e ao comportamento do material em situação de incêndio.

Os sistemas construtivos estruturados em aço tornaram-se mais usuais com a percepção das vantagens supracitadas. Não obstante, a aplicação do concreto armado é predominante nacionalmente, visto que parcela significativa da mão de obra brasileira é qualificada apenas para os sistemas construtivos como o concreto armado e a alvenaria estrutural, e que o custo da estrutura metálica tende a ser superior. Entretanto, o uso das estruturas metálicas em uma obra racionaliza os processos, reduz a mão de obra e encurta o prazo de entrega do empreendimento, o que ajuda a diminuir os custos da obra e do prazo de retorno do investimento. Em outras

palavras, o tempo de execução pode ser aplicado como referência de custo. Logo, há diversos fatores a serem analisados para a decisão do sistema construtivo a ser adotado pela empresa, evidenciando a importância em estudar a escolha do tipo de estrutura (CBCA, 2015b).

A ABNT NBR 8800:2008, publicada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), com base no método dos estados-limites, estabelece os requisitos básicos que devem ser obedecidos no projeto à temperatura ambiente de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações. Atualmente a ABNT NBR 8800:2008 está em processo de revisão, sendo que o projeto de revisão utilizado como referência no presente trabalho é o PR NBR 8800:2022, versão de fevereiro de 2022. Portanto, a pesquisa visa identificar as alterações propostas pelo PR NBR 8800:2022 e comparar com os resultados obtidos ao dimensionar barras comprimidas em perfis soldados com dupla simetria pelas prescrições da norma vigente.

Aponta-se que é importante revisar as normas técnicas existentes e elaborar novas normalizações para garantir a qualidade, segurança e eficiência das edificações. Em outras palavras, o processo de revisão das normas é fundamental para o exercício da profissão dos engenheiros estruturais.

Em linhas gerais, para alcançar os objetivos expostos, faz-se um estudo comparativo entre a ABNT NBR 8800:2008 e o PR NBR 8800:2022. Primeiro, na revisão bibliográfica são mapeadas as alterações propostas pelo projeto de revisão. Prossegue-se o estudo ao organizar os equacionamentos em planilhas eletrônicas, com foco em barras comprimidas de perfis soldados, pois o Estado Limite Último de barras prismáticas submetidas à força axial de compressão sofreu maiores mudanças. Finalmente, para consolidar a base comparativa, tem-se os resultados obtidos para diferentes seções transversais plotados em gráficos. Deste modo, o leitor poderá examinar como a capacidade resistente e o aproveitamento do material são impactados pelas novas equações do projeto de revisão. Ao longo do trabalho, evidencia-se que os estados-limites últimos relacionados com a força axial de tração, o momento fletor e a força cortante não sofreram mudanças tão impactantes quanto a força axial de compressão.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho consiste na comparação entre a norma vigente ABNT NBR 8800:2008 e o projeto de revisão PR NBR 8800:2022. O objetivo específico é verificar as alterações no projeto de revisão a respeito das instabilidades local e global, pois as principais mudanças no dimensionamento de elementos de aço ocorreram no equacionamento de barras submetidas à força axial de compressão. Por esta razão, duas planilhas eletrônicas foram elaboradas para a verificação de barras comprimidas em perfis soldados com dupla simetria. Portanto, ao estabelecer uma base comparativa entre a norma vigente e o projeto de revisão, pode-se avaliar os impactos no cálculo da força axial de compressão resistente de cálculo. Ressalta-se que o escopo do trabalho é aprofundar no dimensionamento de barras comprimidas formadas por perfis H soldados, visto que as equações dos estados-limites últimos de barras prismáticas submetidas aos esforços solicitantes de tração, flexão e cortante não sofreram modificações significativas. Ao final do trabalho, explica-se como as alterações propostas pelo projeto de revisão influenciam na capacidade resistente das barras comprimidas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 *Histórico da norma brasileira*

Conforme informa Fakury (2007), a NB-14 (1952) foi a primeira norma no Brasil que abordava o projeto e execução de estruturas constituídas por perfis laminados e soldados à temperatura ambiente. Em 1968, a NB-14 foi revisada. Essa norma fundamentava-se na DIN 4114 (1952), norma alemã elaborada por Deutsche Industrie Normen (DIN), baseada no método das tensões admissíveis.

Na década de 70, normas e especificações internacionais eram utilizadas por profissionais no Brasil em decorrência da carência por uma norma nacional atualizada. Conseqüentemente, o desenvolvimento das estruturas metálicas no Brasil foi dificultado, visto que os profissionais não aplicavam as mesmas referências no dimensionamento de estruturas metálicas. Salienta-se que as particularidades da construção nacional não eram consideradas nas normas internacionais empregadas (FAKURY, 2007).

Na década de 80, foi elaborada a ABNT NBR 8800:1986, norma brasileira responsável por alavancar a segurança estrutural ao aplicar o método dos estados-limites. Adicionalmente, a norma incluía prescrições sobre o projeto de vigas mistas de aço e concreto. Destaca-se que essa norma foi elaborada a partir das normas europeia ECCS (1976), canadense CAN/CSA-S 16.1 (1984) e americana AISC-LRFD (1986) (FAKURY, 2007). As siglas são, respectivamente, European Convention For Constructional Steel Work (ECCS), Canadian Standards Association (CAN/CSA), e American Institute of Steel Construction (AISC).

Na década de 90, foi elaborada a ABNT NBR 14323:1999, norma brasileira sobre projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio (FAKURY, 2007).

Em 2001, um grupo de especialistas começou a produzir um texto-base de revisão da norma ABNT NBR 8800:1986. Entretanto, como a ABNT NBR 8800:1986 estava obsoleta, a revisão a transformou em uma nova norma (FAKURY, 2007).

Em 2003, o primeiro texto-base da revisão da ABNT NBR 8800:1986 foi concluído, disponibilizado aos interessados e encaminhado à ABNT para os procedimentos formais. Em

sequência, formou-se a Comissão de Estudos CE-02:125.03 e decidiu-se elaborar um novo texto-base (FAKURY, 2007).

Em 2005, foi divulgado o novo texto-base e a comunidade enviou sugestões de melhorias para a equipe de revisão. Em 2006, foi divulgada a nova versão do texto-base com as sugestões pertinentes acrescentadas. Após divulgar a nova versão, novos comentários recebidos foram avaliados e incorporados no texto-base (FAKURY, 2007).

Em 2008, divulgou-se a ABNT NBR 8800:2008, norma vigente para o projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.

Atualmente a ABNT NBR 8800:2008 está em processo de revisão, sendo que os trabalhos são executados pela CE-02:125.03 – Comissão de Estudo de Estruturas de Aço e Mistas de Aço e Concreto. A comissão foi reativada em maio de 2021 por solicitação da Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural (ABECE) e deu início aos trabalhos partindo de uma minuta preparada por um grupo na ABECE. Ao longo das reuniões foram discutidas e analisadas contribuições para todas as seções do corpo principal da norma e anexos, além de correções e ajustes no texto atual, incluindo figuras e tópicos. As atualizações são incorporadas para que posteriormente o texto seja encaminhado à ABNT para consulta nacional (ABECE, 2021).

Destaca-se que no presente trabalho será analisado o projeto de revisão PR NBR 8800:2022, versão de fevereiro de 2022. O projeto de revisão será comparado com a norma vigente ABNT NBR 8800:2008.

3.2 Comparações entre a norma vigente e o projeto de revisão

3.2.1 Título

O título proposto no PR NBR 8800:2022 é “Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações”, enquanto na ABNT NBR 8800:2008 é “Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios”. Portanto, substituiu-se a palavra edifícios por edificações.

3.2.2 Sumário

O PR NBR 8800:2022 propõe a adição de novos tópicos, a remoção de alguns itens presentes na ABNT NBR 8800:2008, a substituição do termo flambagem por instabilidade e o rearranjo parcial das informações.

Dentre os itens acrescentados no sumário do projeto de revisão, destaca-se: “4.5 Avaliação de Conformidade de Projeto”; “5.3.4 Área efetiva da seção” para barras comprimidas; “5.3.5 Valores da força axial de instabilidade elástica” para barras comprimidas; “6.7.1 Considerações gerais” para bases de pilares; “6.7.1 Dimensionamento da ligação” para bases de pilares; “I.4 Critérios de aceitabilidade” para vibrações em pisos, “Anexo P (informativo) Uso de elementos finitos para análise de estruturas de aço”.

Quanto aos itens presentes no sumário da norma vigente, mas ausentes no sumário do projeto de revisão, cita-se: “4.9.5 Sistemas resistentes a ações horizontais”; “Anexo B (normativo) Prescrições complementares sobre as ações causadas pelo uso e ocupação”; “Anexo E (normativo) Força axial de flambagem elástica e coeficiente de flambagem”; “Anexo F (normativo) Flambagem local de barras axialmente comprimidas”. A justificativa para a remoção do “Anexo B (normativo) Prescrições complementares sobre as ações causadas pelo uso e ocupação” é que este não é mais necessário, visto que a ABNT NBR 6120:2019 é mais completa do que a versão anterior da época de publicação da ABNT NBR 8800:2008. Quanto ao “Anexo E (normativo) Força axial de flambagem elástica e coeficiente de flambagem” e ao “Anexo F (normativo) Flambagem local de barras axialmente comprimidas”, o projeto de revisão realocou parte das informações no corpo do texto da norma, e excluiu algumas informações e equações devido as alterações propostas no método de dimensionamento de barras prismáticas submetidas à força axial de compressão.

O PR NBR 8800:2022 substituiu o termo flambagem por instabilidade. Ao comparar com o sumário da ABNT NBR 8800:2008, nota-se “5.7.5 Flambagem lateral da alma” passou para “5.7.5 Instabilidade lateral da alma”; “5.7.6 Flambagem da alma por compressão” passou para “5.7.6 Instabilidade da alma por compressão”; “O.2.5 Verificação da flambagem lateral com distorção da seção transversal” passou para “L.2.5 Verificação da instabilidade lateral com distorção da seção transversal”; “P.1.4 Flambagem local dos elementos de aço” passou para “M.1.4 Estabilidade local dos perfis de aço da seção mista”.

Quanto a alteração da ordem das informações, o item “P.5.4 Momentos fletores de plastificação de cálculo” passou para “M.5.5 Momentos fletores resistentes de cálculo”; “Anexo L (normativo) Vibrações em pisos” passou para “Anexo I (normativo) Vibrações em pisos”; e houve alteração na localização das informações sobre bases de pilares. O item “L.3 Avaliação simplificada para as atividades humanas normais” foi substituído por “I.2 Avaliação simplificada para o caminhar de pessoas”.

Finalmente, o “Anexo D (normativo) Método da amplificação dos esforços solicitantes” passou para “Anexo C (informativo) Método da amplificação dos esforços solicitantes”, pois a Comissão de Estudos decidiu transformar o anexo em informativo.

3.2.3 Prefácio

As atualizações no texto do prefácio do PR NBR 8800:2022 são sutis e não alteram a ideia geral do prefácio da ABNT NBR 8800:2008.

3.2.4 Introdução

Não foram identificadas alterações no PR NBR 8800:2022.

3.2.5 Escopo

O PR NBR 8800:2022 não cita a ABNT NBR 15279:2005 no escopo ao informar sobre perfis soldados, pois a norma foi cancelada em 2021.

3.2.6 Referências normativas

No que concerne as referências normativas, o PR NBR 8800:2022 atualiza a identificação das normas, remove algumas referências e adiciona uma referência. O intuito é citar as versões vigentes e aplicáveis das normas nacionais e internacionais. Dentre as normas atualizadas, destacam-se ABNT NBR 5884:2013; ABNT NBR 6118:2014; ABNT NBR 14762:2010; ANSI/AISC 360-16; ASTM A307-14; e AISC 303-16. Em relação as referências removidas, mencionam-se a ABNT NBR 15279:2005; ASTM A325-04b; ASTM A490-04a; e Research Council on Structural Connections (2004). A referência adicional é ASTM F3125/F3125M-15a. Enfatiza-se que está pendente atualizar o ano da ABNT NBR 6120:2019 e da AWS D1.1/D1.1M:2020, visto que as versões citadas no projeto de revisão são obsoletas. A sigla

ASTM indica American Institute of Steel Construction, enquanto AWS é American Welding Society.

3.2.7 Simbologia e unidades

3.2.7.1 Simbologia

Dentre as alterações identificadas no PR NBR 8800:2022, destaca-se a remoção da informação “K – coeficiente de flambagem de barras comprimidas”; e a substituição do termo flambagem por instabilidade. Quanto a aplicação do termo instabilidade, os exemplos são “Q – fator de redução total associado à instabilidade local”; “ Q_a ; Q_s – fatores de redução que levam em conta a instabilidade local de elementos AA e AL, respectivamente”; e “ χ_{dist} – fator de redução para instabilidade lateral com distorção da seção transversal”. Contudo, ressalta-se que não foram identificadas as equações de aplicação de Q, Q_a e Q_s na seção que aborda barras prismáticas submetidas à força axial de compressão do projeto de revisão. Em linhas gerais, as atualizações na simbologia estão atreladas as alterações em barras prismáticas submetidas à força axial de compressão.

3.2.7.2 Unidades

Não foram identificadas alterações no PR NBR 8800:2022.

3.2.8 Condições gerais de projeto

3.2.8.1 Generalidades

Não foram identificadas alterações no PR NBR 8800:2022.

3.2.8.2 Desenhos de projeto

Não foram identificadas alterações no PR NBR 8800:2022.

3.2.8.3 Desenhos de fabricação

Não foram identificadas alterações no PR NBR 8800:2022.

3.2.8.4 Desenhos de montagem

Não foram identificadas alterações no PR NBR 8800:2022.

3.2.8.5 Avaliação de Conformidade de Projeto

O PR NBR 8800:2022 propõe a inclusão do item “4.5 Avaliação de Conformidade de Projeto”. Em linhas gerais, quando o contratante ou órgão público solicita a avaliação de conformidade

de projeto, esta deve ser realizada por um profissional habilitado que avalie o projeto feito por outro antes da fabricação e montagem da estrutura metálica.

3.2.8.6 Materiais

No PR NBR 8800:2022, item “4.6.2.2 Aços para perfis, barras e chapas”, é prescrito que a razão entre a resistência à ruptura (f_u) e a resistência ao escoamento (f_y) deve ser $f_u/f_y \geq 1,15$. Por sua vez, a ABNT NBR 8800:2008 indica $f_u/f_y \geq 1,18$. Em sequência, o projeto de revisão traz que $f_u/f_y \geq 1,10$ quando os valores são efetivamente medidos pelas usinas siderúrgicas. Adicionalmente, o item informa que a relação entre as deformações específicas correspondente às resistências à ruptura (ϵ_u) e ao escoamento (ϵ_y) seja $\epsilon_u/\epsilon_y \geq 15$, e que a deformação máxima na ruptura (ϵ_r) não pode ser inferior a 15%.

O projeto de revisão adiciona o item 4.6.2.2.3, cuja finalidade é afirmar a importância em utilizar o valor nominal da resistência do aço informado na norma mesmo quando o profissional tem acesso aos valores característicos obtidos de ensaios. O item explica que valor nominal é diferente de valor característico.

No item “4.6.3 Concreto e aço das armaduras” do PR NBR 8800:2022, corrigiu-se a equação do módulo de elasticidade do concreto (E_c) e acrescentou-se o parâmetro que depende da rocha matriz da brita (α_c). Na ABNT NBR 8800:2008 não aparece o parâmetro α_c , o que é incorreto por não seguir as prescrições da ABNT NBR 6118:2014.

3.2.8.7 Segurança e estados-limites

Não foram identificadas alterações no PR NBR 8800:2022.

3.2.8.8 Ações

Em relação aos esforços decorrentes da variação uniforme de temperatura, ao comparar o item “4.8.3 Ações variáveis” do PR NBR 8800:2022 com o “4.7.3 Ações variáveis” da ABNT NBR 8800:2008, nota-se que o projeto de revisão exclui a recomendação de considerar para variação da temperatura da atmosfera um valor de 60% da diferença entre as temperaturas médias máxima e mínima no local da obra, com um mínimo de 10°C.

No que tange aos coeficientes de ponderação das ações, há alterações nas notas da “Tabela 1 – Valores dos coeficientes de ponderação das ações $\gamma_f = \gamma_{f1} \gamma_{f3}$ ” do PR NBR 8800:2022. Ao comparar os arquivos, conclui-se que o projeto de revisão indica valores menores para os

coeficientes de ponderação das ações agrupadas. A ABNT NBR 8800:2008 permite considerar como coeficiente de ação permanente direta agrupada em combinação normal o valor de 1,35 se as ações variáveis decorrentes do uso e ocupação superarem 5 kN/m², e 1,40 caso não superem. Por outro lado, o projeto de revisão informa 1,35 como coeficiente de ação permanente direta agrupada em combinação normal independente de as ações variáveis superarem ou não 5 kN/m². Destaca-se que o projeto de revisão informa que o coeficiente de ponderação de ação variável agrupada, exceto temperatura, pode ser adotado como 1,50 independente da intensidade das cargas variáveis não favoráveis a segurança. O projeto de revisão também propõe alterações nos valores dos coeficientes de ponderação de ações permanentes diretas agrupadas e ações variáveis agrupadas em combinações especiais ou de construção, e combinações excepcionais.

3.2.8.9 Resistências

O PR NBR 8800:2022 informa no item “4.9.1.1 Valores característicos e nominais” que o valor característico deve ser substituído pelo valor nominal fornecido por norma ou especificação aplicável ao material. Por sua vez, na ABNT NBR 8800:2008 é opcional substituir o valor característico pelo valor nominal, sendo que para a norma vigente o termo nominal pode significar tanto resistência característica quanto resistência nominal. Em outras palavras, o projeto de revisão distingue os termos, enquanto a norma vigente considera os termos análogos. Adicionalmente, nota-se que a palavra flambagem, presente no item 4.8.2.1 da norma vigente, foi excluído e não aparece no item 4.9.2.1 do projeto de revisão.

3.2.8.10 Estabilidade e análise estrutural

Em relação a estabilidade e análise estrutural, o PR NBR 8800:2022 acrescenta o item 4.10.3.4. Este item traz informações sobre os diafragmas horizontais de edifícios, estruturas projetadas para transferir ações horizontais e estabilizar pilares contraventados. De acordo com o projeto de revisão, os diafragmas devem resistir a forças horizontais iguais a 0,5% do valor das forças axiais solicitantes de cálculo de todos os pilares contraventados do andar, multiplicados pelo fator de redução (α_{red}). Destaca-se que essas forças horizontais são valores mínimos para o cálculo dos diafragmas.

A respeito da classificação das estruturas quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais, o PR NBR 8800:2022 acrescenta o item 4.10.4.5, que informa que os limites iguais a 1,10 e 1,40 são

para quando não se considera as imperfeições iniciais de material. Se as imperfeições de material forem consideradas, os limites devem ser alterados para 1,13 e 1,55.

De acordo com o item 4.9.4.7 da ABNT NBR 8800:2008, não é necessário considerar na análise as imperfeições iniciais de material para classificar a estrutura quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais. Contudo, não foi localizada informação análoga no PR NBR 8800:2022.

O item “4.9.5 Sistema resistente a ações horizontais” da ABNT NBR 8800:2008 foi realocado e corresponde aos itens 4.10.5.1 e 4.10.5.2 do PR NBR 8800:2022. Ainda sobre sistema resistente a ações horizontais, não é apresentado no projeto de revisão as informações do item 4.9.5.3 da norma vigente. Este item define elemento isolado como elemento em que o comportamento independe do restante da estrutura, e permite tratar elemento isolado como elemento contraventado.

Acerca das considerações para dimensionamento, as informações do item 4.9.6.2 da ABNT NBR 8800:2008 não estão presentes no PR NBR 8800:2022. O item informa que nos métodos de análise apresentados na subseção permite-se para barras prismáticas o uso do comprimento de flambagem igual ao comprimento destravado da barra, ou seja, a adoção do coeficiente de flambagem (K) igual a 1,0, sendo que o uso de valores de K superiores a 1,0 é substituído por imperfeições geométricas e de materiais iniciais equivalentes.

Finalmente, o item “4.10.7.2 Estruturas de grande deslocabilidade” do PR NBR 8800:2022 adiciona que é necessário incluir os efeitos das imperfeições geométricas iniciais e de materiais na análise rigorosa de estruturas de grande deslocabilidade. Além disso, o projeto de revisão torna mais ampla a aplicação do procedimento de análise de estruturas de média deslocabilidade para situações com imperfeições geométricas iniciais. Tal afirmação é baseada na ABNT NBR 8800:2008 somente por mencionar combinações últimas de ações com o vento, enquanto o projeto de revisão generaliza ao referir a combinações com ações variáveis horizontais.

3.2.8.11 Análise estrutural de vigas contínuas e semicontínuas

Não foram identificadas alterações no PR NBR 8800:2022.

3.2.8.12 Resistência e rigidez das contenções laterais

O PR NBR 8800:2022 remove as informações presentes no item 4.11.1.2 da ABNT NBR 8800:2008, cujo texto é sobre os dois tipos de contenção lateral, a relativa e a nodal.

Os itens “4.11.2 Pilares” e “4.11.3 Vigas” da ABNT NBR 8800:2008 correspondem aos itens “4.12.2 Pilares” e “4.12.3 Vigas” do PR NBR 8800:2022. Percebe-se que houve alterações significativas, pois no projeto de revisão não há distinção entre contenções nodais e relativas, enquanto a norma vigente diferencia a equação a ser utilizada para cálculo da força resistente de cálculo e a rigidez necessárias das contenções relativas e nodais. O projeto de revisão adota para ambas contenções as equações indicadas para contenções nodais na norma vigente.

3.2.8.13 Integridade estrutural

Acerca da integridade estrutural, o PR NBR 8800:2022 substituí o termo escora por contenção. Como exemplo, cita-se que no item 4.13.4 do projeto de revisão não aparece a palavra escora, mas no item análogo da norma vigente, o 4.12.4, tem-se escora e contenção no texto. Idem para os itens 4.13.5, 4.13.6, e 4.13.7 do projeto de revisão.

O item 4.13.7 do PR NBR 8800:2022 reduziu de 75 kN para 45 kN o valor mínimo da força de compressão e de tração de cálculo utilizado no dimensionamento das contenções dos pilares de extremidade e suas ligações em estruturas de coberturas e pisos sem lajes de concreto.

3.2.9 Condições específicas para o dimensionamento de elementos de aço

3.2.9.1 Condições gerais

Observa-se que em “5.1.2 Relações entre largura e espessura em elementos comprimidos dos perfis de aço” do PR NBR 8800:2022, itens 5.1.2.1.3, 5.1.2.1.4, 5.1.2.1.5 e 5.1.2.2.1, substituiu-se flambagem por instabilidade.

3.2.9.2 Barras prismáticas submetidas à força axial de tração

Observa-se que as principais alterações propostas no dimensionamento de barras tracionadas pelo PR NBR 8800:2022 são atreladas ao cálculo do coeficiente de redução da área líquida (C_t), excentricidade da ligação (e_c) e furos. Em decorrência do escopo do presente trabalho não aprofundar sobre dimensionamento de ligações metálica, apresenta-se um resumo das principais alterações identificadas.

Em relação ao item “5.2.4 Área líquida” do PR NBR 8800:2022, comparando-se 5.2.4.1 do projeto de revisão com o texto correspondente da ABNT NBR 8800:2008, excluiu-se a informação de que se for possível garantir que os furos sejam executados com broca, pode-se usar a largura dos furos igual à dimensão máxima dos furos.

No item “5.2.5 Coeficiente de redução” do PR NBR 8800:2022, houve alterações nos cálculos do coeficiente de redução da área líquida (C_t). Dentre as alterações, destaca-se que no projeto de revisão não consta o intervalo $0,60 \leq C_t \leq 0,90$. Em sequência, modificou-se o cálculo do C_t para chapas planas quando a força de tração é transmitida somente por soldas longitudinais ao longo de ambas as bordas, pois o projeto de revisão acrescenta uma equação para calcular o C_t . Adicionalmente, acrescentaram-se equações para obter o C_t em perfis tubulares circulares e retangulares onde a força de tração é transmitida através de uma chapa de ligação concêntrica, e para barras com seções tubulares circulares quando a força de tração é transmitida por meio de uma chapa de ligação concêntrica.

Finalmente, alterou-se no projeto de revisão a equação da excentricidade da ligação (e_c) para barras com seções tubulares retangulares quando a força de tração é transmitida por meio de uma chapa de ligação concêntrica ou por chapas de ligação em dois lados opostos da seção.

Ressalta-se que o procedimento para verificar barras prismáticas submetidas à força axial de tração não sofreu alterações significativas ao comparar a norma vigente com o projeto de revisão. Logo, não faz parte do escopo do trabalho apresentar as equações da força axial resistente de cálculo.

3.2.9.3 Barras prismáticas submetidas à força axial de compressão

O PR NBR 8800:2022 propõe alterações no dimensionamento de barras prismáticas submetidas à força axial de compressão. Em linhas gerais, as alterações envolvem a aplicação da palavra instabilidade ao invés de flambagem; remoção do “K – coeficiente de flambagem de barras comprimidas”, “Q – fator de redução total associado à flambagem local”, e “ Q_a ; Q_s – fatores de redução que levam em conta a flambagem local de elementos AA e AL, respectivamente”, presentes nas equações da ABNT NBR 8800:2008; e o acréscimo de novas equações atreladas ao cálculo da largura efetiva (b_{ef}). Destaca-se que AA significa que as duas bordas longitudinais do elemento da seção são vinculadas, enquanto AL é apenas uma borda longitudinal vinculada.

No item “5.3.2 Força axial resistente de cálculo” do PR NBR 8800:2022, trocou-se flambagem local por instabilidade local. Em sequência, alterou-se a equação da força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$), pois removeu-se o fator de redução total associado a flambagem local (Q) e substituiu-se a área bruta da seção transversal da barra (A_g) por área efetiva da seção transversal da barra (A_{ef}). As Equações 1 e 2 são dadas no PR NBR 8800:2022, e as Equações 3 e 4 são encontradas na ABNT NBR 8800:2008.

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi A_{ef} f_y}{\gamma_{a_1}} \quad (1)$$

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd} \quad (2)$$

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a_1}} \quad (3)$$

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd} \quad (4)$$

Nota-se que a “Figura 11 – Valor de χ em função do índice de esbeltez λ_0 ” e a “Tabela 4 – Valor de χ em função do índice de esbeltez λ_0 ” apresentadas no item “5.3.3 Fator de redução χ ” da ABNT NBR 8800:2008 não são inclusas no PR NBR 8800:2022. Os equacionamentos completos do projeto de revisão e da norma vigentes são apresentados, respectivamente, no Apêndice A e no Apêndice B.

No PR NBR 8800:2022, item “5.3.3 Fator de redução χ ”, tópico 5.3.3.2, alterou-se a equação do índice de esbeltez reduzido (λ_0), pois o fator de redução total associado a flambagem local (Q) não é apresentado na equação. Além disso, a força axial de flambagem elástica (N_e) passou a ser força axial de instabilidade elástica (N_e). Contudo, destaca-se que as equações para calcular o fator de redução associado à resistência a compressão (χ) não sofreram modificações. As Equações 5, 6 e 7 são do PR NBR 8800:2022, e as Equações 8, 9 e 10 são da ABNT NBR 8800:2008. A atualização corresponde a Equação 5, enquanto a Equação 8 encontra-se na norma vigente. Nota-se que a Equação 6 é idêntica a Equação 9, assim como a Equação 7 é igual a Equação 10, pois estas equações não sofreram alterações.

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A_g f_y}{N_e}} \quad (5)$$

$$\lambda_0 \leq 1,5 \rightarrow \chi = 0,658^{(\lambda_0)^2} \quad (6)$$

$$\lambda_0 > 1,5 \rightarrow \chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \quad (7)$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_e}} \quad (8)$$

$$\lambda_0 \leq 1,5 \rightarrow \chi = 0,658^{(\lambda_0)^2} \quad (9)$$

$$\lambda_0 > 1,5 \rightarrow \chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \quad (10)$$

Observa-se que o PR NBR 8800:2022 rearranja as informações sobre barras prismáticas submetidas à força axial de compressão. As informações apresentadas na ABNT NBR 8800:2008 nos “Anexo E (normativo) Força axial de flambagem elástica e coeficiente de flambagem” e “Anexo F (normativo) Flambagem local de barras axialmente comprimidas” são abordadas no corpo do projeto de revisão nos itens “5.3.4 Área efetiva da seção” e “5.3.5 Valores da força axial de instabilidade elástica”. Saliencia-se que parte do conteúdo sobre compressão da norma vigente foi suprimido.

No item “5.3.4.1 Generalidades” do PR NBR 8800:2022, substituiu-se o termo flambagem local por instabilidade local. Em sequência, apresenta-se que $A_{ef} = A_g$ quando $b/t \leq (b/t)_{lim}$. Por sua vez, na ABNT NBR 8800:2008, $Q = 1,00$ se $(b/t) \leq (b/t)_{lim}$. Segundo o projeto de revisão, quando um ou mais elementos componentes da seção transversal possuem $(b/t) > (b/t)_{lim}$, calculam-se as larguras efetivas usando as novas equações propostas para obter as áreas efetivas. Em contrapartida, na norma vigente, quando $(b/t) > (b/t)_{lim}$, calcula-se Q_s para elementos AL e Q_a para elementos AA com o intuito de multiplica-los para obter o fator Q. Em outras palavras, no projeto de revisão não são analisados os fatores Q_a , Q_s e Q. Ainda no mesmo item, a alteração identificada na “Tabela 5 – Valores de $(b/t)_{lim}$ ” do projeto de revisão é a substituição de chapas de travejamento por chapas espaçadoras. As novas equações do projeto de revisão são apresentadas nas Equações 11 a 21.

Comparando-se a ABNT NBR 8800:2008 e o PR NBR 8800:2022, nota-se alterações no procedimento de cálculo para encontrar a área efetiva de peças comprimidas e considerar a instabilidade local, pois o fator de redução total associado a flambagem local (Q) foi excluído das novas equações. O novo método consiste em calcular (b/t) e $(b/t)_{lim}/\sqrt{\chi}$ para a alma e a mesa dos perfis e encontrar a largura efetiva (b_{ef}) para a alma e as mesas. Após calcular b_{ef} , multiplica-se pela espessura do respectivo elemento e soma-se todas as contribuições para encontrar a área efetiva (A_{ef}). Para calcular o b_{ef} , o projeto de revisão introduz a tensão de instabilidade local elástica (σ_{el}) e os fatores C_1 e C_2 para o cálculo da instabilidade local. As atualizações são indicadas nas Equações 11 a 21. Em contrapartida, as Equações 22 a 27 são apresentadas na norma vigente.

$$Mesa \rightarrow \left(\frac{b}{t}\right) = \frac{b_f}{2 t_f} \rightarrow \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 0,64 \sqrt{\frac{E}{(f_y / k_c)}} \quad (11)$$

$$0,35 \leq k_c = \frac{4}{\sqrt{h / t_w}} \leq 0,76 \quad (12)$$

$$Alma \rightarrow \left(\frac{b}{t}\right) = \frac{d - 2 t_f}{t_w} \rightarrow \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (13)$$

$$Alma e mesa \rightarrow \left(\frac{b}{t}\right) \leq \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} \rightarrow b_{ef} = b \rightarrow A_{ef} = A_g \quad (14)$$

$$Mesa \rightarrow \left(\frac{b}{t}\right) > \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} \rightarrow \begin{cases} \left(\frac{b}{t}\right) \leq \frac{\left(\frac{b}{t}\right)_{lim}}{\sqrt{\chi}} \rightarrow b_{ef} = b \\ \left(\frac{b}{t}\right) > \frac{\left(\frac{b}{t}\right)_{lim}}{\sqrt{\chi}} \rightarrow b_{ef} = b \left(1 - C_1 \sqrt{\frac{\sigma_{el}}{\chi f_y}}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{el}}{\chi f_y}} \end{cases} \quad (15)$$

$$Alma \rightarrow \left(\frac{b}{t}\right) > \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} \rightarrow \begin{cases} \left(\frac{b}{t}\right) \leq \frac{\left(\frac{b}{t}\right)_{lim}}{\sqrt{\chi}} \rightarrow b_{ef} = b \\ \left(\frac{b}{t}\right) > \frac{\left(\frac{b}{t}\right)_{lim}}{\sqrt{\chi}} \rightarrow b_{ef} = b \left(1 - C_1 \sqrt{\frac{\sigma_{el}}{\chi f_y}}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{el}}{\chi f_y}} \end{cases} \quad (16)$$

$$\sigma_{el} = \left(C_2 \frac{(b/t)_{lim}}{(b/t)} \right) f_y \quad (17)$$

$$Mesa \rightarrow \text{Elemento AL} \rightarrow \begin{cases} C_1 = 0,22 \\ C_2 = 1,49 \end{cases} \quad (18)$$

$$Alma \rightarrow \text{Elemento AA} \rightarrow \begin{cases} C_1 = 0,18 \\ C_2 = 1,31 \end{cases} \quad (19)$$

$$Alma e mesa \rightarrow \left(\frac{b}{t} \right) \leq \left(\frac{b}{t} \right)_{lim} \rightarrow A_{ef} = A_g \quad (20)$$

$$Alma e/ou mesa \rightarrow \left(\frac{b}{t} \right) > \left(\frac{b}{t} \right)_{lim} \rightarrow A_{ef} = \sum (b_{ef} t) \quad (21)$$

$$Mesa \rightarrow \begin{cases} \left(\frac{b}{t} \right) = \frac{b_f}{2 t_f} \\ \left(\frac{b}{t} \right)_{lim} = 0,64 \sqrt{\frac{E}{(f_y / k_c)}} \\ \left(\frac{b}{t} \right)_{sup} = 1,17 \sqrt{\frac{E}{(f_y / k_c)}} \end{cases} \quad (22)$$

$$Mesa \rightarrow \begin{cases} \left(\frac{b}{t} \right) \leq \left(\frac{b}{t} \right)_{lim} \rightarrow Q_s = 1,0 \\ \left(\frac{b}{t} \right)_{lim} < \left(\frac{b}{t} \right) \leq \left(\frac{b}{t} \right)_{sup} \rightarrow Q_s = 1,415 - 0,65 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{k_c E}} \\ \left(\frac{b}{t} \right)_{sup} < \left(\frac{b}{t} \right) \rightarrow Q_s = \frac{0,90 E k_c}{f_y \left(\frac{b}{t} \right)^2} \end{cases} \quad (23)$$

$$0,35 \leq k_c = \frac{4}{\sqrt{h / t_w}} \leq 0,76 \quad (24)$$

$$Alma \rightarrow \begin{cases} \left(\frac{b}{t} \right) = \frac{d - 2 t_f}{t_w} \\ \left(\frac{b}{t} \right)_{lim} = 1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \end{cases} \quad (25)$$

$$Alma \left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{b}{t}\right) \leq \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} \rightarrow Q_a = 1,0 \\ \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} < \left(\frac{b}{t}\right) \rightarrow b_{ef} = 1,92 t \sqrt{\frac{E}{f_y}} \left[1 - \frac{0,34}{\left(\frac{b}{t}\right)} \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right] \leq b \rightarrow Q_a = \frac{A_g - \sum(b - b_{ef}) t}{A_g} \end{array} \right. \quad (26)$$

$$Q = Q_s Q_a \quad (27)$$

No que concerne as seções tubulares circulares, no item “5.3.4.3 Área efetiva de seções tubulares circulares” do PR NBR 8800:2022, são indicadas as equações para calcular área efetiva (A_{ef}) que substituem o cálculo do fator de redução total associado a flambagem local (Q).

Em “5.3.5 Valores da força axial de instabilidade elástica”, item “5.3.5.1 Seções com dupla simetria ou simétricas em relação a um ponto”, PR NBR 8800:2022, o coeficiente de flambagem (K_x , K_y e K_z) não aparece nas equações da força axial de instabilidade elástica (N_{ex} , N_{ey} e N_{ez}), e o termo flambagem foi substituído por instabilidade. O comprimento destravado é indicado por L (L_x , L_y e L_z). Além disso, removeu-se a “Tabela E.1 – Coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados” da ABNT NBR 8800:2008. Portanto, ao modelar estruturas metálicas em softwares, caso a análise estrutural leve em consideração as imperfeições, utiliza-se nas equações de dimensionamento das peças comprimidas o comprimento destravado. Todavia, salienta-se que a força axial de instabilidade elástica (N_e) permanece como o menor dos valores calculados. As Equações 28 a 32 são fornecidas no projeto de revisão, enquanto as Equações 33 a 37 são da norma vigente.

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 E I_x}{(L_x)^2} \quad (28)$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(L_y)^2} \quad (29)$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(L_z)^2} + G J \right] \quad (30)$$

$$r_0 = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2} \quad (31)$$

$$N_e \leq \begin{cases} N_{ex} \\ N_{ey} \\ N_{ez} \end{cases} \quad (32)$$

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x L_x)^2} \quad (33)$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_y)^2} \quad (34)$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + G J \right] \quad (35)$$

$$r_0 = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2} \quad (36)$$

$$N_e \leq \begin{cases} N_{ex} \\ N_{ey} \\ N_{ez} \end{cases} \quad (37)$$

No PR NBR 8800:2022, item “5.3.5.2 Seções monossimétricas, exceto o caso de cantoneiras simples previsto em 5.3.5.4”, as alterações são substituir flambagem por instabilidade e remover o coeficiente de flambagem (K) das equações da força axial de instabilidade elástica (N_e).

No PR NBR 8800:2022, item “5.3.5.4 Cantoneiras simples conectadas por uma aba”, tópico 5.3.5.4.1, acrescentam-se condições para que os efeitos da excentricidade a força de compressão sejam considerados por meio de um comprimento destravado equivalente. Adicionou-se a limitação $L_{x1}/r_{x1} \leq 200$; a razão entre a largura da aba maior e da aba menor não superior a 1,7; e $b/t \leq 0,71\sqrt{(E/f_y)}$. Salienta-se que houve a substituição do termo flambagem por instabilidade, a remoção do K da equação do N_e , e no tópico 5.3.5.4.2 excluiu-se o K da equação.

No item “5.3.6 Limitação do índice de esbeltez” do PR NBR 8800:2022, removeu-se o K da equação e a relação passou a ser $L/r \leq 200$, onde L é o comprimento destravado e r é o raio de

giração correspondente. As Equações 38 e 39 são encontradas, respectivamente, no projeto de revisão e na norma vigente.

$$\lambda_{max} = \frac{L}{r} = \pi \sqrt{\frac{A_g E}{N_e}} \leq 200 \quad (38)$$

$$\lambda_{max} = \frac{K L}{r} = \pi \sqrt{\frac{A_g E}{N_e}} \leq 200 \quad (39)$$

Sobre o “Anexo F (normativo) Flambagem local de barras axialmente comprimidas” da ABNT NBR 8800:2008, parte significativa das informações não são abordadas no projeto de revisão. Por exemplo, as informações sobre como calcular Q_s , Q_a e Q foram excluídas.

Os equacionamentos completos do PR NBR 8800:2022 e da ABNT NBR 8800:2008 para perfis soldados submetidos à força axial de compressão são apresentados, respectivamente, no Apêndice A e no Apêndice B. Observa-se que o novo procedimento proposto pelo projeto de revisão consiste em primeiro analisar a instabilidade global e depois a instabilidade local. Por outro lado, na norma vigente primeiro analisa-se a instabilidade local e em seguida a instabilidade global.

Salienta-se que dentre todos os estados-limites últimos de perfis I e H, os dimensionamentos das barras prismáticas submetidas à força axial de compressão sofreram alterações mais significativas, sobretudo na obtenção da largura efetiva das mesas e da alma. Por esta razão, o foco do presente trabalho consiste em analisar barras comprimidas.

3.2.9.4 Barras prismáticas submetidas a momento fletor e força cortante

Os anexos utilizados na verificação de barras prismáticas submetidas a momento fletor foram realocados e são “Anexo D (normativo) Momento fletor resistente de cálculo de vigas de alma não-esbelta” e “Anexo E (normativo) Momento fletor resistente de cálculo de vigas de alma esbelta” no PR NBR 8800:2022. No presente trabalho será analisado somente o dimensionamento de perfis de alma não-esbelta.

Nos itens “5.4.2 Momento fletor resistente de cálculo” e “5.4.3 Força cortante resistente de cálculo” do PR NBR 8800:2022, substituiu-se flambagem por instabilidade. Consequentemente, ao invés de FLA corresponder a Flambagem Local da Alma, trocou-se para

instabilidade local da alma. Adicionalmente, o termo flambagem por cisalhamento foi substituído por instabilidade por cisalhamento.

O texto do PR NBR 8800:2022 tornou explícito no item 5.4.2.3 que a equação para calcular o fator de modificação para diagrama de momento fletor não-uniforme (C_b) é para atuação de força transversais na semialtura da seção transversal. Essa informação estava implícita na ABNT NBR 8800:2008. Ressalta-se que na ABNT NBR 8800:2008 era requisito $C_b \leq 3,0$, mas no projeto de revisão essa limitação não está indicada. Este mesmo texto do projeto de revisão detalha para quais casos o parâmetro de monossimetria (R_m) é igual a 1,0, e propões uma singela alteração na equação do parâmetro R_m ao trocar I_{yc} por $I_{y,m}$ para seções com um eixo de simetria, fletidas em relação ao eixo de não simetria e submetidas à curvatura reversa. Todavia, o significado de $I_{y,m}$ permanece como momento de inércia, em relação ao eixo de simetria, da mesa de menor momento de inércia. Em sequência, o item inclui que para seções monossimétricas fletidas em relação ao eixo que não é de simetria e em balanço, ambas as mesas das duas extremidades do comprimento destravado devem ser impedidas de deslocar lateralmente. Finalmente, o item 5.4.2.3 informa que o cálculo do fator C_b para casos específicos também pode ser obtido por análise estrutural ou por procedimento aceito pela comunidade técnico-científica.

Enfatiza-se que não foram identificadas no item “5.4.3.1 Seções I, H e U fletidas em relação ao eixo perpendicular à alma”, tópico 5.4.3.1.1, PR NBR 8800:2022, as equações para calcular o parâmetro de esbeltez limite para seções semicompactas (λ_r) e a força cortante resistente de cálculo (V_{Rd}) quando o parâmetro de esbeltez (λ) é $\lambda > \lambda_r$. Consultou-se o corpo do projeto de revisão, mas as equações não foram localizadas. Todavia, ao analisar a norma internacional ANSI/AISC 360-16, constata-se que $\lambda_r = 1,37\sqrt{(k_v E)/f_y}$, assim como na norma vigente ABNT NBR 8800:2008. Diante do exposto, supõe-se que o projeto de revisão está acidentalmente sem as equações mencionadas a priori.

A ABNT NBR 8800:2008 baseia-se na ANSI/AISC 360-05, enquanto o PR NBR 8800:2022 acompanha a ANSI/AISC 360-16. Em decorrência da norma internacional ANSI/AISC 360-16 alterar o coeficiente de flambagem da alma por cisalhamento (k_v) e aumentar $k_v = 5,0$ para $k_v = 5,34$ nos casos de almas sem enrijecedores transversais, para $a/h > 3$ ou para $a/h > [260/(h/t_w)]^2$, o projeto de revisão seguiu a mesma modificação. Esta mudança é identificada no item “5.4.3.1 Seções I, H e U fletidas em relação ao eixo perpendicular à alma”, tópico 5.4.3.1.1, PR NBR

8800:2022. Este fato evidencia que a norma nacional acompanha as melhorias das normas internacionais. Destaca-se que a ANSI/AISC 360-16 informa que na versão anterior o valor era $k_v = 5,0$.

Ressalta-se que o procedimento para verificar barras prismáticas submetidas a momento fletor e força cortante nos estados-limites últimos não sofreu alterações significativas ao comparar a norma vigente com o projeto de revisão. Logo, não faz parte do escopo do trabalho apresentar as equações do momento fletor resistente de cálculo e da força cortante resistente de cálculo.

3.2.9.5 Barras prismáticas submetidas à combinação de esforços solicitantes

No item “5.5.2.1 Seções tubulares circulares e retangulares submetidas exclusivamente à torção” do PR NBR 8800:2022, o termo flambagem por torção foi substituído por instabilidade por torção. Salienta-se que ao longo do projeto de revisão há erros de digitação da palavra instabilidade.

3.2.9.6 Barras de seção variável

Não foram identificadas alterações no PR NBR 8800:2022.

3.2.9.7 Mesas e almas de perfis I e H submetidos a forças transversais localizadas

No geral, o PR NBR 8800:2022 emprega a palavra instabilidade em substituição a flambagem. Nota-se essa alteração nos itens “5.7.5 Instabilidade lateral da alma”; “5.7.6 Instabilidade da alma por compressão”; e nos tópicos 5.7.9.3 e 5.7.9.4 do projeto de revisão.

No item “5.7.7 Cisalhamento do painel de alma” do PR NBR 8800:2022, a força cortante solicitante de cálculo transmitida pelas mesas passou a ser identificado como N_{sd} ao invés de F_{sd} . Entretanto, a alteração não é impactante.

O item “5.7.9 Exigências adicionais para enrijecedores para forças localizadas”, PR NBR 8800:2022, informa que os enrijecedores devem estender pelo menos até $\frac{3}{4}$ da altura da alma. Por sua vez, a ABNT NBR 8800:2008 prescreve que os enrijecedores devem se estender pelo menos até metade da altura da alma.

3.2.10 Condições específicas para o dimensionamento de ligações metálicas

No que diz respeito as condições específicas para o dimensionamento de ligações metálicas, o PR NBR 8800:2022 traz atualizações. Não obstante, por ser um assunto extenso que não faz parte do escopo do trabalho, as alterações não são discutidas e detalhadas.

3.2.1 Condições específicas para o dimensionamento de elementos mistos de aço e concreto

A seção indica os anexos utilizados para o dimensionamento de elementos mistos de aço e concreto.

3.2.2 Condições específicas para o dimensionamento de ligações mistas

A seção indica o anexo utilizado no dimensionamento de ligações mistas

3.2.3 Considerações adicionais de dimensionamento

Não foram identificadas alterações no PR NBR 8800:2022.

3.2.4 Condições adicionais de projeto

Não foram identificadas alterações no PR NBR 8800:2022.

3.2.5 Estados-limites de serviço

Não foram identificadas alterações no PR NBR 8800:2022.

3.2.6 Requisitos básicos de fabricação, montagem e controle de qualidade

A primeira alteração identificada no PR NBR 8800:2022 está no item “12.1.2 Símbolos padronizados e nomenclatura”, e é informar que as exigências de inspeção da estrutura devem obedecer à AWS D1.1/D1.1M:2020. Por sua vez, a ABNT NBR 8800:2008 indica AWS WI:2000. Salienta-se que no item “2 Referências normativas” do PR NBR 8800:2022 é indicada a versão obsoleta AWS D1.1/D1.1M:2008.

Finalmente, no item “12.4 Controle de qualidade”, tópico “12.4.1 Generalidades”, PR NBR 8800:2022; acrescenta-se que o montador, em conjunto com o fabricante, deve estabelecer os métodos de controle de qualidade e inspeção, para garantir que todo o trabalho executado siga

o plano de inspeção e testes aprovados e elaborados conforme a norma. Em contrapartida, a ABNT NBR 8800:2008 não menciona a participação do montador, tampouco torna explícita a importância dos métodos de controle de qualidade, plano de inspeção e testes.

3.2.7 Anexo A (normativo) Aços estruturais e materiais de ligação

Em relação as propriedades mecânicas exigidas por norma, removeu-se do item A.2.3 do PR NBR 8800:2022 as informações sobre a resistência ao escoamento do aço (f_y) não superar 450MPa e a relação entre a resistência à ruptura do aço à tração (f_u) e a resistência ao escoamento do aço (f_y) ser maior ou igual a 1,18.

Na “Tabela A.2 – Aços de uso frequente especificados pela ASTM para uso estrutural” do PR NBR 8800:2022, removeu-se a informação de que a relação f_u/f_y não pode ser inferior a 1,18. Em contrapartida, o projeto de revisão prescreve consultar o item 4.6.2.2.1 que, por sua vez, indica razão maior ou igual a 1,15.

Na “Tabela A.3 – Materiais usados em parafusos” do PR NBR 8800:2022 há alterações nos valores da resistência ao escoamento do material do parafuso (f_{yb}) e da resistência à ruptura do material do parafuso (f_{ub}) para o aço ASTM F3125 A325, e f_{ub} para o ASTM F3125 A490. As alterações decorrem das referências ASTM A325-04b e ASTM A490-04a serem obsoletas e substituídas pela ASTM F3125/F3125 M-15a.

3.2.8 Anexo B (normativo) Deslocamentos máximos

O conteúdo do “Anexo B (normativo) Deslocamentos máximos” do PR NBR 8800:2022 é idêntico ao conteúdo do “Anexo C (normativo) Deslocamentos máximos” da ABNT NBR 8800:2008.

3.2.9 Anexo C (informativo) Método da amplificação dos esforços solicitantes

O conteúdo do “Anexo C (informativo) Método da amplificação dos esforços solicitantes” do PR NBR 8800:2022 é semelhante ao conteúdo do “Anexo D (normativo) Método da amplificação dos esforços solicitantes” da ABNT NBR 8800:2008.

Nota-se erro de digitação no item C.2.1 do projeto de revisão, pois o mesmo atrela estruturas nt (*no translation*) com o momento fletor solicitante de cálculo (M_{lt}) e a força axial solicitante de cálculo (N_{lt}), obtidos por análise elástica de primeira ordem em estruturas It (*lateral*

translation). Em outras palavras, a correção necessária é que M_{lt} e N_{lt} não são encontrados ao analisar estruturas nt.

O item C.2.3 do PR NBR 8800:2022 informa que o deslocamento horizontal interpavimento (Δ_h) do andar considerado deve ser obtido da análise de primeira ordem na estrutura lt. No mesmo item, afirma-se que a estrutura lt pode ser usada para determinar a força cortante no andar (ΣH_{sd}). Enquanto a ABNT NBR 8800:2008 menciona estrutura original ou estrutura lt em ambas as frases, o projeto de revisão menciona somente estrutura lt.

Observa-se que o projeto de revisão substituiu flambagem elástica por instabilidade elástica, e muda o anexo de normativo para informativo.

3.2.10 Anexo D (normativo) Momento fletor resistente de cálculo de vigas de alma não-esbelta

O conteúdo do “Anexo D (normativo) Momento fletor resistente de cálculo de vigas de alma não-esbelta” do PR NBR 8800:2022 é semelhante ao conteúdo do “Anexo G (normativo) Momento fletor resistente de cálculo de vigas de alma não-esbelta” da ABNT NBR 8800:2008. Destaca-se que no presente trabalho são analisados perfis de alma não-esbelta, ou seja, perfis com relação entre altura plana da alma (h) e espessura da alma (t_w) não superior ao parâmetro de esbeltez limite para seções semicompactas (λ_r).

Em relação as seções T fletidas em relação ao eixo central de inércia perpendicular à alma, o item D.2.3 do PR NBR 8800:2022 adiciona o estado-limite de escoamento, que é aplicável apenas quando a extremidade livre da alma estiver comprimida. A equação consiste em encontrar o momento resistente de cálculo (M_{Rd}) pelo produto entre a tensão de escoamento (f_y) e o módulo de resistência elástico do lado comprimido da seção (W_c), dividindo o resultado pelo coeficiente $\gamma_{al} = 1,10$.

Nos itens D.2.5 e D.2.8, PR NBR 8800:2022, substituiu-se estado-limite de flambagem local por estado-limite de instabilidade local. Além disso, no item “D.3 Simbologia”, trocou-se flambagem por instabilidade nas descrições dos símbolos e adicionou “ t – espessura em geral”.

No item D.2.7, PR NBR 8800:2022, adicionou-se equações para calcular o momento fletor resistente de cálculo (M_{Rd}) em seções sólidas retangulares fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia, para o estado-limite de instabilidade lateral com torção (FLT), que é o

único aplicável. Por esta razão, as equações para seções retangulares fletidas em relação ao maior momento de inércia na FLT não são apresentadas na “Tabela D.1 – Parâmetros referentes ao momento fletor resistente” do projeto de revisão. Em relação as notas da tabela citada a priori, alterou-se a nota 9, pois o projeto de revisão informa $0,1 \leq \alpha_y \leq 0,9$, enquanto a ABNT NBR 8800:2008 apresenta $1/9 \leq \alpha_y \leq 9$, onde o coeficiente α_y é dado pela razão entre o momento de inércia da mesa comprimida (I_{yc}) e o momento de inércia da mesa tracionada (I_{yt}). Finalmente, nota-se que no terceiro grupo da tabela não consta a informação sobre os perfis I e H serem com dois eixos de simetria.

Diante do exposto, conclui-se que não houve alteração das equações utilizadas no dimensionamento de perfis I e H com dupla simetria submetidas a momento fletor.

3.2.11 Anexo E (normativo) Momento fletor resistente de cálculo de vigas de alma esbelta

O conteúdo do “Anexo E (normativo) Momento fletor resistente de cálculo de vigas de alma esbelta” do PR NBR 8800:2022 é semelhante ao conteúdo do “Anexo H (normativo) Momento fletor resistente de cálculo de vigas de alma esbelta” da ABNT NBR 8800:2008. Ressalta-se que não é escopo do presente trabalho dimensionar vigas de alma esbelta e detalhar as mudanças propostas pelo projeto de revisão.

O item E.1.3 do PR NBR 8800:2022 informa $0,1 \leq \alpha_y \leq 0,9$, enquanto a ABNT NBR 8800:2008 apresenta $1/9 \leq \alpha_y \leq 9$, onde o coeficiente α_y é dado pela razão entre o momento de inércia da mesa comprimida (I_{yc}) e o momento de inércia da mesa tracionada (I_{yt}). Quanto as mudanças de palavra, substituiu-se flambagem por instabilidade. Finalmente, no item E.2.2 há algumas alterações, como a forma como é definida a relação a_r e o acréscimo da informação que A_{fc} é a área da mesa comprimida.

3.2.12 Anexo F (normativo) Aberturas em almas de vigas

O conteúdo do “Anexo F (normativo) Aberturas em almas de vigas” do PR NBR 8800:2022 é idêntico ao conteúdo do “Anexo I (normativo) Aberturas em almas de vigas” da ABNT NBR 8800:2008.

3.2.13 Anexo G (normativo) Requisitos para barras de seção variável

O conteúdo do “Anexo G (normativo) Requisitos para barras de seção variável” do PR NBR 8800:2022 é idêntico ao conteúdo do “Anexo J (normativo) Requisitos para barras de seção variável” da ABNT NBR 8800:2008. A única alteração consiste em substituir flambagem por instabilidade.

3.2.14 Anexo H (normativo) Fadiga

O conteúdo do “Anexo H (normativo) Fadiga” do PR NBR 8800:2022 equivale ao conteúdo do “Anexo K (normativo) Fadiga” da ABNT NBR 8800:2008. Este anexo sofreu alterações que não serão analisadas no presente trabalho.

3.2.15 Anexo I (normativo) Vibrações em pisos

O conteúdo do “Anexo I (normativo) Vibrações em pisos” do PR NBR 8800:2022 equivale ao conteúdo do “Anexo L (normativo) Vibrações em pisos” da ABNT NBR 8800:2008. Este anexo sofreu alterações, pois ao passo que a norma vigente apresenta as informações em apenas uma página, o projeto de revisão é mais completo e traz sete páginas. Contudo, as alterações não são escopo do presente trabalho

3.2.16 Anexo J (normativo) Vibrações devidas ao vento

O conteúdo do “Anexo J (normativo) Vibrações devidas ao vento” do PR NBR 8800:2022 é idêntico ao conteúdo do “Anexo M (normativo) Vibrações devidas ao vento” da ABNT NBR 8800:2008.

3.2.17 Anexo K (normativo) Durabilidade de componentes de aço frente à corrosão

O conteúdo do “Anexo K (normativo) Durabilidade de componentes de aço frente a corrosão” do PR NBR 8800:2022 é idêntico ao conteúdo do “Anexo N (normativo) Durabilidade de componentes de aço frente à corrosão” da ABNT NBR 8800:2008.

3.2.18 Anexo L (normativo) Vigas mistas de aço e concreto

O conteúdo do “Anexo L (normativo) Vigas mistas de aço e concreto” do PR NBR 8800:2022 é semelhante ao conteúdo do “Anexo O (normativo) Vigas mistas de aço e concreto” da ABNT NBR 8800:2008. Este anexo sofreu alterações que não serão analisadas no presente trabalho.

3.2.19 Anexos excluídos do PR NBR 8800:2022

O “Anexo B (normativo) Prescrições complementares sobre as ações causadas pelo uso e ocupação”, apresentado na ABNT NBR 8800:2008, foi suprimido, pois a ABNT NBR 6120:2019 é mais completa do que a versão anterior da época de publicação da ABNT NBR 8800:2008 e a revisão da ABNT NBR 6120:2019 aborda os conteúdos do anexo excluído. Este anexo é sobre ações concentradas, carregamento parcial, impacto, sobrecarga em coberturas, sobrecarga em lajes na fase de construção, ações e combinação de ações de pontes rolantes.

O “Anexo E (normativo) Força axial de flambagem elástica e coeficiente de flambagem” e o “Anexo F (normativo) Flambagem local de barras axialmente comprimidas”, apresentados na ABNT NBR 8800:2008, tiveram parte das informações inseridas no corpo do PR NBR 8800:2022, item “5.3 Barras prismáticas submetidas à força axial de compressão”. Entretanto, parcela significativa do conteúdo e das equações foram substituídas pelo novo procedimento de cálculo proposto no projeto de revisão. O Apêndice A apresenta o procedimento de cálculo do PR NBR 8800:2022, enquanto o Apêndice B corresponde ao passo a passo da ABNT NBR 8800:2008 para barras comprimidas.

3.3 Generalidades sobre estruturas metálicas

3.3.1 Perfis metálicos e propriedades mecânicas

Conforme o modo de obtenção, os perfis estruturais previstos pela ABNT NBR 8800:2008 e pelo PR NBR 8800:2022 podem ser classificados em perfis laminados e perfis soldados. Há ainda os perfis formados a frio, abordados em outras normas. Os perfis laminados são obtidos por laminação, uma transformação mecânica em que a forma do corpo metálico é alterada. Os perfis soldados são obtidos pelo corte, composição e soldagem de chapas planas de aço (DIAS, 2006; FAKURY *et al.*, 2016).

Os perfis metálicos de seção aberta devem ser fabricados com aços que tenham propriedades mecânicas adequadas para a utilização em peças submetidas a tensões e deformações, além de durabilidade que atenda às exigências de vida útil, como a resistência à corrosão (FAKURY *et al.*, 2016).

Segundo Fakury *et al.* (2016), as propriedades mecânicas de um material definem o seu comportamento quando submetido a esforços mecânicos. Dentre as propriedades mecânicas

gerais do aço estrutural, cita-se o módulo de elasticidade longitudinal (E), o coeficiente de Poisson (ν), o módulo de elasticidade transversal (G) e a massa específica (ρ). De acordo com a ABNT NBR 8800:2008 e com o PR NBR 8800:2022, para efeito de cálculo dos perfis laminados e soldados, os valores a serem adotados para estas propriedades são, respectivamente, 20000 kN/cm², 0,3, 7700 kN/cm² e 7850 kg/m³.

Quanto a resistência ao escoamento (f_y) e a resistência à ruptura do aço à tração (f_u), optou-se por considerar, neste trabalho, as barras compostas por chapas de USI CIVIL 350, aço de baixa liga e alta resistência mecânica, com $f_y = 35$ kN/cm² e $f_u = 50$ kN/cm². Este material é produzido pela USIMINAS (2021), usina siderúrgica nacional, e foi escolhido por ser fornecido na forma de chapas e amplamente utilizado na construção civil em componente estruturais. Destaca-se que este aço tem qualificação estrutural aprovada pela ABNT NBR 8800:2008 e pelo PR NBR 8800:2022.

3.3.2 Elementos estruturais

Dias (2006) descreve a estrutura como a parte ou o conjunto das partes de uma construção que se destina a resistir a cargas. As partes da construção, denominadas peças estruturais, têm como função suportar os esforços incidentes e transmiti-los a outras peças, através dos vínculos que as unem, com a finalidade de conduzi-los ao solo.

Segundo Bellei, I. e Bellei, H. (2011), os elementos estruturais de aço podem ser aplicados como vigas, pilares, barras de treliça, barras de contraventamento e barras de pórtico. Os pilares de um edifício são responsáveis por transmitir as cargas da construção para as fundações.

Em decorrência das maiores alterações propostas pelo PR NBR 8800:2022 ocorrerem no dimensionamento de barras prismáticas submetidas à força axial de compressão, optou-se por analisar seções transversais soldadas no formato H, pois o formato H têm a largura das mesas (b_f) próxima da altura (d) da seção, ou seja, razão de aspecto próxima de 1. Portanto, são apropriados para serem submetidos predominantemente à força axial de compressão, como é o caso da maioria dos pilares.

Salienta-se que é necessário verificar a carga de falha (carga de instabilidade) de peças comprimidas. Em análise de segunda ordem, a carga de falha depende das dimensões da seção

da barra e do comprimento livre. Ressalta-se que seções mais robustas e a redução do comprimento destravado contribuem no aumento da carga de instabilidade (DIAS, 2006).

3.3.3 Método dos estados-limites

O método dos estados-limites aplica uma sistemática de dimensionamento que prevê a verificação da estrutura de uma edificação em várias situações extremas, caracterizadas por estados-limites últimos (ELU) e estados-limites de serviço (ELS). Os estados-limites últimos estão relacionados com a segurança da estrutura sujeita às combinações mais desfavoráveis de ações previstas em toda a vida útil, durante a construção ou quando atuar uma ação especial ou excepcional. Por sua vez, os estados-limites de serviço estão relacionados com o desempenho da estrutura sob condições normais de utilização (BELLEI *et al.*, 2008; FAKURY *et al.*, 2016).

No presente trabalho, será analisado o Estado Limite Último de perfis soldados de seção aberta à temperatura ambiente submetidos à força axial de compressão, utilizando a norma vigente ABNT NBR 8800:2008 e o projeto de revisão PR NBR 8800:2022. Ambos documentos adotam o método dos estados-limites. O ELU é relacionado com a segurança da estrutura. A sua ocorrência significa colapso, total ou parcial, e é associada à falha de material, instabilidade de um elemento ou de um conjunto estrutural, ou movimento de corpo rígido. Na verificação da estrutura pelo ELU, considera-se o dimensionamento satisfatório se a força resistente de cálculo de cada componente da estrutura for maior ou igual a força solicitante de cálculo.

3.4 Diferenças entre os conceitos de flambagem e instabilidade

Na disciplina resistência dos materiais, é lecionado o conteúdo de flambagem de barras comprimidas, onde a aplicação da força axial de compressão causa flambagem por flexão. Adicionalmente, são introduzidos os conceitos de carga crítica de Euler e ponto de bifurcação de equilíbrio. Para fins didáticos, as barras prismáticas analisadas são idealizadas, ou seja, consideradas como perfeitamente retilíneas e com materiais homogêneos, não prevendo imperfeição geométrica e de material.

Conforme explica Caldas (2022), na prática, as barras são imperfeitas, pois têm imperfeição geométrica e de material. Cita-se como exemplo as tensões residuais em perfis laminados e soldados oriundas do projeto de fabricação. Para perfis laminados, apesar da alma ter menor espessura do que as mesas, a alma apresenta maior resistência ao escoamento devido à

laminação de sua menor espessura em relação à mesa. Logo, o material não é perfeitamente homogêneo.

Diante do exposto, afirma-se que o conceito de flambagem é para barra perfeita, já instabilidade é para barra real. Na prática, não existe perfeição, visto que as barras apresentam uma certa curvatura antes da aplicação da carga e, ao aplicar o carregamento, o eixo longitudinal sai lateralmente, flexionando até que ela fique instável. A instabilidade é atingida quando a normal e o momento fletor ultrapassam a capacidade resistente da barra, alcançando a carga de falha (carga de instabilidade).

Além disso, o fenômeno da instabilidade local é pouco afetado pelas imperfeições, enquanto para a instabilidade global as imperfeições influenciam significativamente. O pilar falha com uma carga menor do que a teórica carga crítica de flambagem devido à instabilidade atrelada as imperfeições.

Finalmente, não conseguimos produzir uma barra perfeitamente reta ou com material homogêneo, porque seria muito caro produzir um perfil sem imperfeições.

3.5 Análise estrutural de segunda ordem

O comportamento não linear pode ser associado a não linearidade geométrica e a não linearidade do material. O efeito global de segunda ordem, denominado como P-Delta ou não linearidade geométrica, envolve o equilíbrio e as relações de compatibilidade do sistema estrutural carregado sobre sua configuração deformada, o que leva ao deslocamento horizontal da estrutura e possível decréscimo da resistência lateral. Ressalta-se que o efeito das imperfeições geométricas iniciais deve ser considerado para prever possíveis desaprumos de montagem da estrutura. Por sua vez, a não linearidade do material é relacionada ao comportamento inelástico do material. Quanto ao efeito local de segunda ordem, P-delta, caracteriza-se pelas respostas decorrentes dos deslocamentos da configuração deformada de cada barra da estrutura submetida à sua própria força axial (CSI, 2015).

3.6 Dimensionamento de barras prismáticas submetidas à força axial de compressão

3.6.1 Procedimento de cálculo do PR NBR 8800:2022

Em relação aos estados-limites últimos verificados no dimensionamento de elementos de aço, o PR NBR 8800:2022 propõe alterações mais significativas para o dimensionamento de barras prismáticas submetidas à força axial de compressão.

Quanto ao caminho para a obtenção da força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$), primeiro calculam-se as forças axiais de instabilidade elástica por flexão em relação ao eixo x (N_{ex}), por flexão em relação ao eixo y (N_{ey}) e por torção em relação ao eixo z (N_{ez}). A partir destes valores, seleciona-se o menor para ser a força axial de instabilidade elástica (N_e) aplicada na equação do índice de esbelteza reduzido (λ_0). Em sequência, encontra-se o fator de redução associado à resistência à compressão (χ), sendo que a equação a ser utilizada depende se $\lambda_0 \leq 1,5$ ou $\lambda_0 > 1,5$. Em seguida, calcula-se para os elementos componentes da seção transversal, mesas e alma, a razão entre a largura e a espessura de cada elemento (b/t). De posse desses valores, comparam-se com as relações limites (b/t_{lim}) estabelecidas pelo PR NBR 8800:2022 para cada elemento. Caso $(b/t) \leq (b/t_{lim})$, a área efetiva da seção transversal da barra (A_{ef}) é igual a área bruta (A_g). Mas se $(b/t) > (b/t_{lim})$, é necessário comparar (b/t) com $((b/t_{lim})/\sqrt{\chi})$. Então, se $(b/t) \leq ((b/t_{lim})/\sqrt{\chi})$, a largura do elemento (b) é igual à largura efetiva (b_{ef}). Por outro lado, se $(b/t) > ((b/t_{lim})/\sqrt{\chi})$, é necessário obter primeiro a tensão de instabilidade local elástica (σ_{el}) e entrar com a informação na equação da largura efetiva do elemento (b_{ef}). Após analisar as larguras efetivas (b_{ef}) das mesas e da alma, encontra-se a área efetiva da seção transversal da barra (A_{ef}). Finalmente, as informações são aplicadas na equação da força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$).

O equacionamento completo do projeto de revisão para barras prismáticas submetidas à força axial de compressão é apresentado no Apêndice A.

3.6.2 Procedimento de cálculo da ABNT NBR 8800:2008

Apesar da diferença entre os conceitos de flambagem e instabilidade, neste tópico do trabalho, o termo flambagem será mantido para conservar os textos originais das referências bibliográficas.

Fakury *et al.* (2016) informam que no dimensionamento de barras comprimidas, um dos modos de colapso a ser considerado é a instabilidade global da barra, suposta com curvatura inicial. O outro modo é a flambagem local dos elementos componentes da seção, como a flambagem da alma ou das mesas de uma seção I ou H.

Segundo Fakury *et al.* (2016), os elementos que formam os perfis estruturais de seção aberta são denominados apoiados-livres (AL) se apoiados em apenas uma borda longitudinal. Por sua vez, os elementos apoiados-apoiados (AA) têm as duas bordas longitudinais apoiadas. Como exemplo, os perfis I e H são compostos por quatro elementos AL e um AA.

As barras de aço comprimidas são suscetíveis ao fenômeno de flambagem local, que pode ocorrer em elementos AA e/ou AL, exemplificados, respectivamente, como alma e mesa da seção I ou H. Ao analisar os elementos AA e AL são obtidos, respectivamente, os fatores de redução que levam em conta a flambagem local de elementos AA (Q_a) e AL (Q_s), utilizados para encontrar o fator de redução total associado à flambagem local (Q). Em seguida, são analisadas a instabilidade e a esbeltez da barra a partir da obtenção das forças de flambagem por flexão em relação aos eixos x (N_{ex}) e y (N_{ey}), e de flambagem por torção (N_{ez}), para selecionar a menor força (N_e) e utiliza-la no cálculo do índice de esbeltez máximo ($\lambda_{\text{máx}}$). Em sequência, são encontrados o índice de esbeltez reduzido (λ_0) e o fator de redução associado à resistência à compressão (χ). Por fim, calcula-se a força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$).

De acordo com Fakury *et al.* (2016), no dimensionamento aos estados-limites últimos de uma barra submetida à compressão axial, a força axial de compressão solicitante de cálculo ($N_{c,Sd}$), obtida com a combinação de ações de cálculo, não pode superar a força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$). Encontra-se a $N_{c,Rd}$ ao dividir a força axial de compressão resistente nominal ($N_{c,Rk}$) por γ_{a1} , coeficiente tabelado pela ABNT NBR 8800:2008.

Em um perfil submetido à força axial de compressão, pode ocorrer instabilidade de um ou mais destes elementos que compõem a seção transversal. Entretanto, ressalta-se que não estão sujeitos à flambagem local os elementos com razão entre largura (b) e espessura (t) inferior ao valor limite estabelecido pela ABNT NBR 8800:2008, pois neste caso o escoamento ocorre antes da flambagem local. Fakury *et al.* (2016) destacam que a capacidade resistente desses elementos ao fenômeno é pouco influenciada pelas curvaturas iniciais, razão pela qual é tratado com os conceitos teóricos de flambagem.

Fakury *et al.* (2016) explicam que o coeficiente de flambagem (K) de um elemento isolado depende das condições de contorno das extremidades. Interpreta-se o comprimento de flambagem (KL) como o produto entre o coeficiente de flambagem (K) e o comprimento destravado (L). Entretanto, a ABNT NBR 8800:2008 permite usar o valor de K igual a 1,0 quando é desenvolvida uma análise de segunda ordem.

Quanto a flambagem por torção (N_{ez}), a verificação é necessária se a constante de empenamento (C_w) da seção for nula ou quando o comprimento de flambagem por torção (K_zL_z) superar o comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo de menor momento de inércia (K_yL_y) (FAKURY *et al.*, 2016).

Em relação ao índice de esbeltez das barras comprimidas (λ), o resultado não pode superar o índice de esbeltez máximo ($\lambda_{\text{máx}}$) igual a 200. Fakury *et al.* (2016) esclarece que essa limitação visa evitar danos às barras ou o aumento da imperfeição inicial durante as operações de fabricação, transporte e montagem.

O equacionamento completo da norma vigente para barras prismáticas submetidas à força axial de compressão é apresentado no Apêndice B.

3.7 Influências da norma americana ANSI/AISC 360-16 no PR NBR 8800:2022 para o dimensionamento de barras prismáticas submetidas à força axial de compressão

Ao comparar os documentos ANSI/AISC 360-16 e ANSI/AISC 360-10, destaca-se que a versão atualizada informa que o comprimento efetivo do membro comprimido (L_c) pode ser determinado por outros métodos além da aplicação do coeficiente de flambagem de barras comprimidas (K). Esta informação reflete na decisão do PR NBR 8800:2022 em recomendar que seja feita a análise estrutural de segunda ordem e remover o coeficiente K no dimensionamento de perfis I ou H com dupla simetria.

No que concerne à instabilidade global, nota-se que a construção das equações para a obtenção da força axial de instabilidade elástica (N_e) no PR NBR 8800:2022 é semelhante a tensão de flambagem elástica (F_e) apresentada na norma americana ANSI/AISC 360-16. Portanto, é nítido como a ABNT NBR 8800:2008 e o PR NBR 8800:2022 são inspirados na norma americana.

Em relação a instabilidade local, ao comparar os arquivos ANSI/AISC 360-16 e ANSI/AISC 360-10, constata-se que a seção da norma utilizada na verificação de elementos esbeltos foi revisada em sua totalidade, pois atualmente a norma americana considera que elementos esbeltos e não esbeltos devem ser verificados da mesma forma. Diante do exposto, a ANSI/AISC 360-16 remove os fatores de redução que levam em conta a flambagem local de elementos AA (Q_a) e AL (Q_s). As novas equações da ANSI/AISC 360-16 para verificação da instabilidade local e a tabela com os fatores C_1 e C_2 para o cálculo da instabilidade local são empregadas no PR NBR 8800:2022. Logo, é possível afirmar que as alterações propostas no PR NBR 8800:2022 são baseadas na norma americana ANSI/AISC 360-16.

De acordo com o arquivo ANSI/AISC 360-16, a abordagem do fator de redução total associado à flambagem local (Q) para lidar com seções que possuem elementos esbeltos foi adotada na norma de 1969. Antes de 1969, a prática do AISC era remover a largura do elemento que excedia a esbeltez limite e verificar a seção transversal restante quanto à conformidade com a tensão admissível, o que se mostrou ineficiente e antieconômico. Dois procedimentos distintos foram usados a partir de 1969, sendo que elementos apoiados-livres (AL) foram considerados como tendo atingido seu estado limite quando alcançam a tensão de flambagem local teórica, e a outra é que elementos apoiados-apoiados (AA) fazem uso da resistência pós-flambagem inerente a uma placa que é suportada em ambas as suas bordas longitudinais, como em almas de perfis I ou H. O conceito de largura efetiva é usado para obter a resistência pós-flambagem adicional. Esse duplo procedimento reflete a prática de 1969 no projeto de perfis formados a frio. Subseqüentes edições da AISI adotaram o conceito de largura efetiva para elementos AL e AA. Essa abordagem é usada na ANSI/AISC 360-16.

Quanto ao método da largura efetiva, destaca-se que é empregado para determinar a redução na capacidade devido à flambagem local. O método da largura efetiva foi desenvolvido por von Kármán *et al.* (1932), modificado empiricamente por Winter (1947), e generalizado para interação de flambagem local e global por Peköz (1987). O ponto em que o elemento esbelto começa a influenciar a resistência da coluna é uma função da esbeltez do elemento e da esbeltez da barra comprimida. Isso reflete a abordagem de largura efetiva unificada onde a tensão máxima na formulação da largura efetiva é a tensão no pilar. Isso implica que nos pilares designados como tendo elementos esbeltos pode não haver necessariamente qualquer redução na resistência devido à flambagem local, dependendo da tensão no pilar.

Segundo a norma americana ANSI/AISC 360-16, o impacto das mudanças supracitadas para o tratamento de barras comprimidas com elementos esbeltos é maior para elementos AL e pode ser desprezível para elementos AA, conforme mostrado por Geschwindner e Troemner (2016).

4. METODOLOGIA

4.1 *Considerações iniciais*

Conforme especifica a ABNT NBR 8800:2008 e o PR NBR 8800:2022, as propriedades mecânicas relevantes dos aços estruturais são o módulo de elasticidade longitudinal (E) e o módulo de elasticidade transversal (G), que valem, respectivamente, 20000 kN/cm² e 7700 kN/cm².

Quanto ao tipo de aço, adotou-se o USI CIVIL 350, pois o trabalho analisa perfis soldados. Este aço possui resistência ao escoamento (f_y) de 35 kN/cm² e resistência à ruptura do aço à tração (f_u) de 50 kN/cm². Além disso, o USI CIVIL 350 é classificado como aço de baixa liga e alta resistência mecânica e é fabricado pela USIMINAS (2021).

Destaca-se que os elementos estruturais analisados são pilares submetidos à força axial de compressão com comprimento delimitado por valores de índice de esbeltez reduzido (λ_0) pré-estabelecidos. Os valores de λ_0 são substituídos diretamente nas equações do PR NBR 8800:2022 para a obtenção dos comprimentos das barras. O comprimento encontrado para cada seção testada no PR NBR 8800:2022 é aplicado na planilha da ABNT NBR 8800:2008 para a respectiva seção transversal.

Salienta-se que não é escopo da pesquisa verificar a força axial de tração resistente de cálculo, o momento fletor resistente de cálculo e a força cortante resistente de cálculo, porque as alterações propostas pelo PR NBR 8800:2022 não modificam as equações destes estados-limites últimos.

4.2 *Comparação entre a ABNT NBR 8800:2008 e o PR NBR 8800:2022 para o dimensionamento à compressão*

A metodologia empregada no trabalho consiste em obter a força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$) utilizando o PR NBR 8800:2022 e a ABNT NBR 8800:2008 para as seções transversais soldadas selecionadas. Em seguida, apresentar, comparar, analisar e discutir os resultados encontrados por ambos equacionamentos. Os formulários completos do projeto de revisão e da norma vigente são mostrados, respectivamente, nos Apêndices A e B.

Como ponto de partida, optou-se por estudar pilares com valores pré-definidos do índice de esbeltez reduzido (λ_0). Os valores adotados foram $\lambda_0 = 0,0$, $\lambda_0 = 1,0$, e $\lambda_0 = 2,0$. A partir do λ_0

escolhido e aplicado no PR NBR 8800:2022, encontrou-se os comprimentos das barras para cada seção transversal.

No que concerne às seções transversais, a razão de aspecto é próxima de 1. Dentre os perfis tabelados na ABNT NBR 5884:2013, selecionou-se o CS300x76 como a seção transversal de referência. Por este perfil ser compacto, seções transversais hipotéticas foram testadas a partir da alteração da espessura, conservando as larguras dos elementos da seção transversal. O critério empregado na alteração das espessuras consiste em, a partir do perfil soldado CS300x76, usar espessuras de chapas com valores comerciais, de modo a ter seções transversais distintas para cada bateria de testes. Primeiramente, para cada λ_0 pré-estabelecido, foi alterado somente a espessura da alma (t_w) e foram coletados os resultados. Posteriormente, para cada λ_0 pré-estabelecido, foi alterado somente a espessura da mesa (t_f) e foram coletados os resultados. Finalmente, para cada λ_0 pré-estabelecido, foram alteradas as espessuras da alma e da mesa e foram coletados os resultados. Todas as informações são organizadas em tabelas e os dados relevantes são agrupados para a plotagem dos gráficos.

O objetivo de analisar o perfil soldado CS300x76 e as configurações equivalentes com a variação da espessura de um ou ambos elementos é para que as seções apresentem instabilidade local, possibilitando a comparação em gráficos entre o projeto de revisão e a norma vigente. Esta metodologia baseia-se no fato de que a instabilidade global não mudou significativamente no PR NBR 8800:2022, porque apesar do coeficiente de flambagem de barras comprimidas (K) ser suprimido para perfis soldados, a ABNT NBR 8800:2008 já aponta a importância em modelar as estruturas com análises de segunda ordem. A análise de segunda ordem leva em consideração as imperfeições geométricas (aplicação de forças nocionais) e de material (redução do módulo de elasticidade) e, portanto, a norma vigente já indica $K = 1,0$ nesse tipo de análise. Tendo em vista que os profissionais estão mais familiarizados em trabalhar com a análise de segunda ordem, optou-se por omitir o coeficiente K do projeto de revisão. Contudo, manteve-se o coeficiente K para o caso de cantoneiras de abas iguais ou desiguais conectadas pela aba de maior largura.

O perfil CS300x76 apresenta espessura da alma (t_w) de 8 mm, altura da alma (h) de 275 mm, espessura da mesa (t_f) de 12,5 mm e largura da mesa (b_f) de 300mm. Destaca-se que a espessura da alma foi tomada como pelo menos 30% da espessura da mesa, a espessura máxima da alma foi adotada como igual a espessura da mesa, e a espessura da alma não pode ser menor do que

a metade da espessura da mesa menos uma espessura comercial. Enfatiza-se que as larguras dos elementos alma e mesa foram mantidas para todas seções transversais. As espessuras selecionadas visam obedecer aos critérios mencionados, além de permitirem analisar todos os possíveis intervalos de esbeltez da mesa e alma.

Optou-se por analisar quatro seções transversais diferentes para o grupo de testes com variação somente da espessura da mesa, quatro seções transversais diferentes para o grupo de testes com variação somente da espessura da alma e três seções transversais diferentes para o grupo de testes com variação simultânea da espessura da alma e da mesa. As espessuras escolhidas são apresentadas nas Tabelas 1, 2 e 3.

Tabela 1 – Seções transversais com alma constante e variação da espessura da mesa

| Identificação | Espessura da alma | Altura da alma | Espessura da mesa | Largura da mesa |
|---------------|-------------------|----------------|-------------------|-----------------|
| | tw (mm) | h (mm) | tf (mm) | bf (mm) |
| 1º teste | 8,0 | 275,0 | 12,5 | 300,0 |
| 2º teste | 8,0 | 275,0 | 9,5 | 300,0 |
| 3º teste | 8,0 | 275,0 | 8,0 | 300,0 |
| 4º teste | 8,0 | 275,0 | 6,3 | 300,0 |

Fonte: Autora (2022).

Tabela 2 - Seções transversais com mesa constante e variação da espessura da alma

| Identificação | Espessura da alma | Altura da alma | Espessura da mesa | Largura da mesa |
|---------------|-------------------|----------------|-------------------|-----------------|
| | tw (mm) | h (mm) | tf (mm) | bf (mm) |
| 1º teste | 9,5 | 275,0 | 12,5 | 300,0 |
| 2º teste | 8,0 | 275,0 | 12,5 | 300,0 |
| 3º teste | 6,3 | 275,0 | 12,5 | 300,0 |
| 4º teste | 4,75 | 275,0 | 12,5 | 300,0 |

Fonte: Autora (2022).

Tabela 3 - Seções transversais com diferentes espessuras da mesa e da alma

| Identificação | Espessura da alma | Altura da alma | Espessura da mesa | Largura da mesa |
|---------------|-------------------|----------------|-------------------|-----------------|
| | tw (mm) | h (mm) | tf (mm) | bf (mm) |
| 1º teste | 8,0 | 275,0 | 12,5 | 300,0 |
| 2º teste | 6,3 | 275,0 | 9,5 | 300,0 |
| 3º teste | 4,75 | 275,0 | 8,0 | 300,0 |

Fonte: Autora (2022).

Ressalta-se que é de interesse dos profissionais responsáveis por dimensionar estruturas metálicas conhecer as mudanças das equações, saber como influenciam na capacidade resistente e no aproveitamento do material. Salienta-se que modelos de cálculo que levam a um aumento da resistência implicam na otimização do aproveitamento do material, obviamente, a segurança deve ser mantida. Logo, o objetivo da pesquisa é apresentar a porcentagem da alteração da capacidade resistente.

4.3 Instabilidade global e instabilidade local

Na norma vigente, a instabilidade é denominada como flambagem. Contudo, os conceitos são diferentes e o projeto de revisão corrige o texto da norma ao utilizar o termo instabilidade em detrimento de flambagem.

Após observar o equacionamento da ABNT NBR 8800:2008 apresentado no Apêndice B e aplicar os termos utilizados na norma vigente, nota-se que a flambagem local influencia na global, pois primeiro calcula-se o fator de redução total associado à flambagem local (Q) para aplicar o resultado na equação do índice de esbeltez reduzido (λ_0) da flambagem global. Em contrapartida, conclui-se que o mesmo não ocorre no projeto de revisão ao consultar o Apêndice A, porque o PR NBR 8800:2022 remove o fator de redução total associado à instabilidade local (Q) do cálculo do índice de esbeltez reduzido (λ_0), o que é favorável a segurança. Tal afirmação é fundamentada na observação de que se $Q = 1,0$ dentro da formula do λ_0 , o resultado encontrado para λ_0 é maior do que quando $Q < 1,0$. Conseqüentemente, quanto maior o λ_0 , menor o fator de redução associado à resistência à compressão (χ) e menor a força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$). As Equações 5 a 10 evidenciam as alterações.

Destaca-se que o projeto de revisão propõe ordem diferente dos cálculos, onde primeiro analisa-se a instabilidade global e obtém-se o fator χ , para depois inserir o resultado na instabilidade local. O Apêndice A organiza o formulário completo do projeto de revisão para barras comprimidas.

Não obstante, para maior exatidão, seria necessário que os cálculos fossem iterativos, porque a instabilidade local é em função da tensão normal atuante e a máxima tensão normal é influenciada pela instabilidade global. Por sua vez, a instabilidade global depende da rigidez da seção transversal, ou seja, da área efetiva e inércia efetiva. Portanto, os cálculos deveriam ser

feitos até a convergência dos resultados. Contudo, as simplificações propostas pelo caminho da norma vigente ou do projeto de revisão são aceitáveis.

Na ABNT NBR 8800:2008, calcula-se a flambagem local admitindo que a tensão normal é máxima e igual a resistência ao escoamento do aço (f_y). Por outro lado, no PR NBR 8800:2022, calcula-se instabilidade global e, para analisar a instabilidade local, encontra-se a tensão de instabilidade local elástica (σ_{el}) ao invés de admitir que a tensão normal é igual a resistência ao escoamento do aço. A inversão do caminho é justificada pela economia proporcionada pelas alterações. As equações são apresentadas nos Apêndices A e B.

Finalmente, os resultados são plotados utilizando pelo menos três pontos para mostrar o comportamento dos gráficos. Deste modo, é possível identificar a relação entre a força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$), a espessura dos elementos (t_w e t_f), o índice de esbeltez reduzido (λ_0), a área efetiva (A_{ef}) e o fator de redução associado à resistência à compressão (χ). Desta forma, verifica-se como a variável de interesse é influenciada pelo parâmetro alterado.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Coleta de dados

Os resultados das verificações dos perfis são obtidos por planilhas eletrônicas desenvolvidas ao longo do trabalho. A primeira planilha utilizada contém as prescrições do PR NBR 8800:2022 e define a altura do pilar para a correspondente seção transversal e índice de esbeltez reduzido (λ_0) pré-definido. Em seguida, faz-se a comparação com os dados de saída da planilha baseada na ABNT NBR 8800:2008. No estudo, foram analisadas quatro variações de seções transversais de perfis metálicos soldados para verificar o efeito da alteração da espessura da mesa (t_f), quatro variações de seções para verificar o efeito da alteração da espessura da alma (t_w) e três variações de seções para verificar o efeito da alteração simultânea de ambas espessuras. As Tabelas 4 a 12 organizam as informações encontradas para as seções transversais testadas.

Tabela 4 – Testes com $\lambda_0 = 0,0$ no PR NBR 8800:2022 e variação da espessura da mesa

| Pré-determinado $\lambda_0 = 0,0$ no PR NBR 8800:2022 | | | | | | | | |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Seções com alma constante e variação da espessura da mesa | | | | | | | | |
| Item | 1º teste | | 2º teste | | 3º teste | | 4º teste | |
| | PR | ABNT | PR | ABNT | PR | ABNT | PR | ABNT |
| tw (mm) | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 |
| h (mm) | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 |
| tf (mm) | 12,5 | 12,5 | 9,5 | 9,5 | 8,0 | 8,0 | 6,3 | 6,3 |
| bf (mm) | 300,0 | 300,0 | 300,0 | 300,0 | 300,0 | 300,0 | 300,0 | 300,0 |
| Ag (cm ²) | 97,00 | 97,00 | 79,00 | 79,00 | 70,00 | 70,00 | 59,80 | 59,80 |
| L (cm) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Ne (kN) | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |
| λ_0 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| χ | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| Q | - | 1,0000 | - | 0,8952 | - | 0,7977 | - | 0,6189 |
| Aef (cm ²) | 97,00 | 97,00 | 69,29 | 79,00 | 59,50 | 70,00 | 49,04 | 59,80 |
| Ncrd (kN) | 3086,36 | 3086,36 | 2204,70 | 2250,22 | 1893,06 | 1776,80 | 1560,30 | 1177,66 |
| Esbeltez das mesas | a | a | c | d | c | d | c | e |
| Esbeltez da alma | a | a | a | a | a | a | a | a |
| Razão entre Ncrd | 1,000 | | 0,980 | | 1,065 | | 1,325 | |

Fonte: Autora (2022).

Notas:

PR indica PR NBR 8800:2022

ABNT indica ABNT NBR 8800:2008

(a) Intervalo $(b/t) \leq (b/t)_{lim}$

(b) Intervalo $(b/t)_{lim} < (b/t) \leq (b/t)_{lim}/\sqrt{\chi}$

(c) Intervalo $(b/t) > (b/t)_{lim}/\sqrt{\chi}$

(d) Intervalo $(b/t)_{lim} < (b/t) \leq (b/t)_{sup}$

(e) Intervalo $(b/t) > (b/t)_{sup}$

(f) Intervalo $(b/t) > (b/t)_{lim}$

Tabela 5 - Testes com $\lambda_0 = 0,0$ no PR NBR 8800:2022 e variação da espessura da alma

| Pré-determinado $\lambda_0 = 0,0$ no PR NBR 8800:2022 | | | | | | | | |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Seções com mesa constante e variação da espessura da alma | | | | | | | | |
| Item | 1º teste | | 2º teste | | 3º teste | | 4º teste | |
| | PR | ABNT | PR | ABNT | PR | ABNT | PR | ABNT |
| tw (mm) | 9,5 | 9,5 | 8,0 | 8,0 | 6,3 | 6,3 | 4,75 | 4,75 |
| h (mm) | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 |
| tf (mm) | 12,5 | 12,5 | 12,5 | 12,5 | 12,5 | 12,5 | 12,5 | 12,5 |
| bf (mm) | 300,0 | 300,0 | 300,0 | 300,0 | 300,0 | 300,0 | 300,0 | 300,0 |
| Ag (cm ²) | 101,13 | 101,13 | 97,00 | 97,00 | 92,33 | 92,33 | 88,06 | 88,06 |
| L (cm) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Ne (kN) | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |
| λ_0 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| χ | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| Q | - | 1,0000 | - | 1,0000 | - | 0,9687 | - | 0,9194 |
| Aef (cm ²) | 101,13 | 101,13 | 97,00 | 97,00 | 81,37 | 89,82 | 75,13 | 83,90 |
| Ncrd (kN) | 3217,61 | 3217,61 | 3086,36 | 3086,36 | 2589,13 | 2845,61 | 2390,36 | 2576,08 |
| Esbeltez das mesas | a | a | a | a | c | d | c | d |
| Esbeltez da alma | a | a | a | a | c | f | c | f |
| Razão entre Ncrd | 1,000 | | 1,000 | | 0,910 | | 0,928 | |

Fonte: Autora (2022).

Nota: Ver notas da Tabela 4.

Tabela 6 - Testes com $\lambda_0 = 0,0$ no PR NBR 8800:2022 e variação da espessura da mesa e da alma

| Pré-determinado $\lambda_0 = 0,0$ no PR NBR 8800:2022 | | | | | | |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Seções com variação simultânea da espessura da mesa e da alma | | | | | | |
| Item | 1º teste | | 2º teste | | 3º teste | |
| | PR | ABNT | PR | ABNT | PR | ABNT |
| tw (mm) | 8,0 | 8,0 | 6,3 | 6,3 | 4,75 | 4,75 |
| h (mm) | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 |
| tf (mm) | 12,5 | 12,5 | 9,5 | 9,5 | 8,0 | 8,0 |
| bf (mm) | 300,0 | 300,0 | 300,0 | 300,0 | 300,0 | 300,0 |
| Ag (cm ²) | 97,00 | 97,00 | 74,33 | 74,33 | 61,06 | 61,06 |
| L (cm) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Ne (kN) | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |
| λ_0 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| χ | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| Q | - | 1,0000 | - | 0,8342 | - | 0,6633 |
| Aef (cm ²) | 97,00 | 97,00 | 60,90 | 71,82 | 45,59 | 56,90 |
| Ncrd (kN) | 3086,36 | 3086,36 | 1937,89 | 1972,74 | 1450,57 | 1288,77 |
| Esbeltez das mesas | a | a | c | d | c | d |
| Esbeltez da alma | a | a | c | f | c | f |
| Razão entre Ncrd | 1,000 | | 0,982 | | 1,126 | |

Fonte: Autora (2022).

Nota: Ver notas da Tabela 4.

Tabela 7 - Testes com $\lambda_o = 1,0$ no PR NBR 8800:2022 e variação da espessura da mesa

| Pré-determinado $\lambda_o = 1,0$ no PR NBR 8800:2022 | | | | | | | | |
|---|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|
| Seções com alma constante e variação da espessura da mesa | | | | | | | | |
| Item | 1º teste | | 2º teste | | 3º teste | | 4º teste | |
| | PR | ABNT | PR | ABNT | PR | ABNT | PR | ABNT |
| tw (mm) | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 |
| h (mm) | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 |
| tf (mm) | 12,5 | 12,5 | 9,5 | 9,5 | 8,0 | 8,0 | 6,3 | 6,3 |
| bf (mm) | 300,0 | 300,0 | 300,0 | 300,0 | 300,0 | 300,0 | 300,0 | 300,0 |
| Ag (cm ²) | 97,00 | 97,00 | 79,00 | 79,00 | 70,00 | 70,00 | 59,80 | 59,80 |
| L (cm) | 571,94 | 571,94 | 552,52 | 552,52 | 538,65 | 538,65 | 517,19 | 517,19 |
| Ne (kN) | 3395,00 | 3395,00 | 2765,00 | 2765,00 | 2450,00 | 2450,00 | 2093,00 | 2093,00 |
| λ_o | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,946 | 1,000 | 0,893 | 1,000 | 0,787 |
| χ | 0,658 | 0,658 | 0,658 | 0,688 | 0,658 | 0,716 | 0,658 | 0,772 |
| Q | - | 1,0000 | - | 0,8952 | - | 0,7977 | - | 0,6189 |
| Aef (cm ²) | 97,00 | 97,00 | 76,01 | 79,00 | 65,18 | 70,00 | 53,44 | 59,80 |
| Ncrd (kN) | 2030,83 | 2030,83 | 1591,33 | 1547,04 | 1364,67 | 1272,41 | 1118,94 | 908,89 |
| Esbeltez das mesas | a | a | c | d | c | d | c | e |
| Esbeltez da alma | a | a | a | a | a | a | a | a |
| Razão entre Ncrd | 1,000 | | 1,029 | | 1,073 | | 1,231 | |

Fonte: Autora (2022).

Nota: Ver notas da Tabela 4.

Tabela 8 - Testes com $\lambda_o = 1,0$ no PR NBR 8800:2022 e variação da espessura da alma

| Pré-determinado $\lambda_o = 1,0$ no PR NBR 8800:2022 | | | | | | | | |
|---|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|
| Seções com mesa constante e variação da espessura da alma | | | | | | | | |
| Item | 1º teste | | 2º teste | | 3º teste | | 4º teste | |
| | PR | ABNT | PR | ABNT | PR | ABNT | PR | ABNT |
| tw (mm) | 9,5 | 9,5 | 8,0 | 8,0 | 6,3 | 6,3 | 4,75 | 4,75 |
| h (mm) | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 |
| tf (mm) | 12,5 | 12,5 | 12,5 | 12,5 | 12,5 | 12,5 | 12,5 | 12,5 |
| bf (mm) | 300,0 | 300,0 | 300,0 | 300,0 | 300,0 | 300,0 | 300,0 | 300,0 |
| Ag (cm ²) | 101,13 | 101,13 | 97,00 | 97,00 | 92,33 | 92,33 | 88,06 | 88,06 |
| L (cm) | 560,19 | 560,19 | 571,94 | 571,94 | 586,21 | 586,21 | 600,21 | 600,21 |
| Ne (kN) | 3539,38 | 3539,38 | 3395,00 | 3395,00 | 3231,38 | 3231,38 | 3082,19 | 3082,19 |
| λ_o | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,984 | 1,000 | 0,959 |
| χ | 0,658 | 0,658 | 0,658 | 0,658 | 0,658 | 0,667 | 0,658 | 0,681 |
| Q | - | 1,0000 | - | 1,0000 | - | 0,9687 | - | 0,9194 |
| Aef (cm ²) | 101,13 | 101,13 | 97,00 | 97,00 | 92,33 | 89,82 | 86,58 | 83,90 |
| Ncrd (kN) | 2117,19 | 2117,19 | 2030,83 | 2030,83 | 1932,95 | 1897,12 | 1812,60 | 1753,24 |
| Esbeltez das mesas | a | a | a | a | b | d | b | d |
| Esbeltez da alma | a | a | a | a | b | f | c | f |
| Razão entre Ncrd | 1,000 | | 1,000 | | 1,019 | | 1,034 | |

Fonte: Autora (2022).

Nota: Ver notas da Tabela 4.

Tabela 9 - Testes com $\lambda_0 = 1,0$ no PR NBR 8800:2022 e variação da espessura da mesa e da alma

| Pré-determinado $\lambda_0 = 1,0$ no PR NBR 8800:2022 | | | | | | |
|---|----------|---------|----------|---------|----------|---------|
| Seções com variação simultânea da espessura da mesa e da alma | | | | | | |
| Item | 1º teste | | 2º teste | | 3º teste | |
| | PR | ABNT | PR | ABNT | PR | ABNT |
| tw (mm) | 8,0 | 8,0 | 6,3 | 6,3 | 4,75 | 4,75 |
| h (mm) | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 |
| tf (mm) | 12,5 | 12,5 | 9,5 | 9,5 | 8,0 | 8,0 |
| bf (mm) | 300,0 | 300,0 | 300,0 | 300,0 | 300,0 | 300,0 |
| Ag (cm ²) | 97,00 | 97,00 | 74,33 | 74,33 | 61,06 | 61,06 |
| L (cm) | 571,94 | 571,94 | 569,59 | 569,59 | 576,65 | 576,65 |
| Ne (kN) | 3395,00 | 3395,00 | 2601,38 | 2601,38 | 2137,19 | 2137,19 |
| λ_0 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,913 | 1,000 | 0,814 |
| χ | 0,658 | 0,658 | 0,658 | 0,705 | 0,658 | 0,758 |
| Q | - | 1,0000 | - | 0,8342 | - | 0,6633 |
| Aef (cm ²) | 97,00 | 97,00 | 70,39 | 71,82 | 52,99 | 56,90 |
| Ncrd (kN) | 2030,83 | 2030,83 | 1473,77 | 1391,35 | 1109,35 | 976,34 |
| Esbeltez das mesas | a | a | c | d | c | d |
| Esbeltez da alma | a | a | b | f | c | f |
| Razão entre Ncrd | 1,000 | | 1,059 | | 1,136 | |

Fonte: Autora (2022).

Nota: Ver notas da Tabela 4.

Tabela 10 - Testes com $\lambda_0 = 2,0$ no PR NBR 8800:2022 e variação da espessura da mesa

| Pré-determinado $\lambda_0 = 2,0$ no PR NBR 8800:2022 | | | | | | | | |
|---|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|
| Seções com alma constante e variação da espessura da mesa | | | | | | | | |
| Item | 1º teste | | 2º teste | | 3º teste | | 4º teste | |
| | PR | ABNT | PR | ABNT | PR | ABNT | PR | ABNT |
| tw (mm) | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 |
| h (mm) | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 |
| tf (mm) | 12,5 | 12,5 | 9,5 | 9,5 | 8,0 | 8,0 | 6,3 | 6,3 |
| bf (mm) | 300,0 | 300,0 | 300,0 | 300,0 | 300,0 | 300,0 | 300,0 | 300,0 |
| Ag (cm ²) | 97,00 | 97,00 | 79,00 | 79,00 | 70,00 | 70,00 | 59,80 | 59,80 |
| L (cm) | 1143,88 | 1143,88 | 1105,03 | 1105,03 | 1077,29 | 1077,29 | 1034,37 | 1034,37 |
| Ne (kN) | 848,75 | 848,75 | 691,25 | 691,25 | 612,50 | 612,50 | 523,25 | 523,25 |
| λ_0 | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 1,892 | 2,000 | 1,786 | 2,000 | 1,573 |
| χ | 0,219 | 0,219 | 0,219 | 0,245 | 0,219 | 0,275 | 0,219 | 0,354 |
| Q | - | 1,0000 | - | 0,8952 | - | 0,7977 | - | 0,6189 |
| Aef (cm ²) | 97,00 | 97,00 | 79,00 | 79,00 | 70,00 | 70,00 | 59,80 | 59,80 |
| Ncrd (kN) | 676,69 | 676,69 | 551,11 | 551,11 | 488,33 | 488,33 | 417,17 | 417,17 |
| Esbeltez das mesas | a | a | b | d | b | d | b | e |
| Esbeltez da alma | a | a | a | a | a | a | a | a |
| Razão entre Ncrd | 1,000 | | 1,000 | | 1,000 | | 1,000 | |

Fonte: Autora (2022).

Nota: Ver notas da Tabela 4.

Tabela 11 - Testes com $\lambda_0 = 2,0$ no PR NBR 8800:2022 e variação da espessura da alma

| Pré-determinado $\lambda_0 = 2,0$ no PR NBR 8800:2022 | | | | | | | | |
|---|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|
| Seções com mesa constante e variação da espessura da alma | | | | | | | | |
| Item | 1º teste | | 2º teste | | 3º teste | | 4º teste | |
| | PR | ABNT | PR | ABNT | PR | ABNT | PR | ABNT |
| tw (mm) | 9,5 | 9,5 | 8,0 | 8,0 | 6,3 | 6,3 | 4,75 | 4,75 |
| h (mm) | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 |
| tf (mm) | 12,5 | 12,5 | 12,5 | 12,5 | 12,5 | 12,5 | 12,5 | 12,5 |
| bf (mm) | 300,0 | 300,0 | 300,0 | 300,0 | 300,0 | 300,0 | 300,0 | 300,0 |
| Ag (cm ²) | 101,13 | 101,13 | 97,00 | 97,00 | 92,33 | 92,33 | 88,06 | 88,06 |
| L (cm) | 1120,39 | 1120,39 | 1143,88 | 1143,88 | 1172,42 | 1172,42 | 1200,43 | 1200,43 |
| Ne (kN) | 884,84 | 884,84 | 848,75 | 848,75 | 807,84 | 807,84 | 770,55 | 770,55 |
| λ_0 | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 1,968 | 2,000 | 1,918 |
| χ | 0,219 | 0,219 | 0,219 | 0,219 | 0,219 | 0,226 | 0,219 | 0,238 |
| Q | - | 1,0000 | - | 1,0000 | - | 0,9687 | - | 0,9194 |
| Aef (cm ²) | 101,13 | 101,13 | 97,00 | 97,00 | 92,33 | 89,82 | 88,06 | 83,90 |
| Ncrd (kN) | 705,46 | 705,46 | 676,69 | 676,69 | 644,07 | 644,07 | 614,34 | 614,34 |
| Esbeltez das mesas | a | a | a | a | b | d | b | d |
| Esbeltez da alma | a | a | a | a | b | f | b | f |
| Razão entre Ncrd | 1,000 | | 1,000 | | 1,000 | | 1,000 | |

Fonte: Autora (2022).

Nota: Ver notas da Tabela 4.

Tabela 12 - Testes com $\lambda_0 = 2,0$ no PR NBR 8800:2022 e variação da espessura da mesa e da alma

| Pré-determinado $\lambda_0 = 2,0$ no PR NBR 8800:2022 | | | | | | |
|---|----------|---------|----------|---------|----------|---------|
| Seções com variação simultânea da espessura da mesa e da alma | | | | | | |
| Item | 1º teste | | 2º teste | | 3º teste | |
| | PR | ABNT | PR | ABNT | PR | ABNT |
| tw (mm) | 8,0 | 8,0 | 6,3 | 6,3 | 4,75 | 4,75 |
| h (mm) | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 |
| tf (mm) | 12,5 | 12,5 | 9,5 | 9,5 | 8,0 | 8,0 |
| bf (mm) | 300,0 | 300,0 | 300,0 | 300,0 | 300,0 | 300,0 |
| Ag (cm ²) | 97,00 | 97,00 | 74,33 | 74,33 | 61,06 | 61,06 |
| L (cm) | 1143,88 | 1143,88 | 1139,18 | 1139,18 | 1153,29 | 1153,29 |
| Ne (kN) | 848,75 | 848,75 | 650,34 | 650,34 | 534,30 | 534,30 |
| λ_0 | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 1,827 | 2,000 | 1,629 |
| χ | 0,219 | 0,219 | 0,219 | 0,263 | 0,219 | 0,331 |
| Q | - | 1,0000 | - | 0,8342 | - | 0,6633 |
| Aef (cm ²) | 97,00 | 97,00 | 74,33 | 71,82 | 61,06 | 56,90 |
| Ncrd (kN) | 676,69 | 676,69 | 518,50 | 518,50 | 425,98 | 425,98 |
| Esbeltez das mesas | a | a | b | d | b | d |
| Esbeltez da alma | a | a | b | f | b | f |
| Razão entre Ncrd | 1,000 | | 1,000 | | 1,000 | |

Fonte: Autora (2022).

Nota: Ver notas da Tabela 4.

5.2 Comparação dos resultados do PR NBR 8800:2022 e da ABNT NBR 8800:2008

A Figura 1 indica que quanto maior a espessura da mesa (t_f), maior a força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$), pois a maior área da seção transversal e o maior momento de inércia contribuem para a resistência da barra submetida a compressão. Adicionalmente, quanto menor o índice de esbeltez reduzido (λ_0), maior a $N_{c,Rd}$, pois o menor comprimento da barra implica em maior resistência. Nota-se pela inclinação dos gráficos que o menor λ_0 gera a maior variação da $N_{c,Rd}$, porque para $\lambda_0 = 2,0$ a variação é a mais sutil. Quando $\lambda_0 = 0,0$, os resultados da $N_{c,Rd}$ calculados pelo PR NBR 8800:2022 são maiores para as seções testadas com $t_f = 6,3\text{mm}$ e $t_f = 8,0\text{mm}$. Se $\lambda_0 = 0,0$ e $t_f = 9,5\text{mm}$, a $N_{c,Rd}$ calculada pelo PR NBR 8800:2022 é ligeiramente menor. Se $\lambda_0 = 0,0$ e $t_f = 12,5\text{mm}$, os valores da $N_{c,Rd}$ são iguais para o PR NBR 8800:2022 e a ABNT NBR 8800:2008. Em relação ao $\lambda_0 = 1,0$, os valores da $N_{c,Rd}$ calculados pelo PR NBR 8800:2022 são maiores para $t_f = 6,3\text{mm}$, $t_f = 8,0\text{mm}$ e $t_f = 9,5\text{mm}$. Se $\lambda_0 = 1,0$ e $t_f = 12,5\text{mm}$, os valores da $N_{c,Rd}$ são iguais para o PR NBR 8800:2022 e a ABNT NBR 8800:2008. Finalmente, se $\lambda_0 = 2,0$, os valores da $N_{c,Rd}$ para cada seção são iguais entre o PR NBR 8800:2022 e a ABNT NBR 8800:2008. As Tabelas 13, 14 e 15 apresentam de forma simplificada as informações descritas acima. Salienta-se que, para $\lambda_0 = 0,0$ e $\lambda_0 = 1,0$, quanto mais esbelta a mesa, maior a diferença entre a $N_{c,Rd}$ calculado pelo PR NBR 8800:2022 e pela ABNT NBR 8800:2008.

A Figura 2 mostra que quanto maior a espessura da alma (t_w), maior a força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$), porque a maior área da seção transversal e o maior momento de inércia contribuem para a resistência da barra submetida a compressão. Além disso, quanto menor o índice de esbeltez reduzido (λ_0), maior a $N_{c,Rd}$, pois o menor comprimento da barra implica em maior resistência. Nota-se pela inclinação dos gráficos que o menor λ_0 gera a maior variação da $N_{c,Rd}$, porque para $\lambda_0 = 2,0$ a variação é a mais sutil. Quando $\lambda_0 = 0,0$, os resultados da $N_{c,Rd}$ calculados pela ABNT NBR 8800:2008 são maiores para os testes com $t_w = 4,75\text{mm}$ e $t_w = 6,3\text{mm}$. Se $\lambda_0 = 0,0$ e $t_w = 8,0\text{mm}$ ou $t_w = 9,5\text{mm}$, os valores da $N_{c,Rd}$ são iguais para o PR NBR 8800:2022 e a ABNT NBR 8800:2008. Em relação ao traçado do $\lambda_0 = 1,0$, os resultados da $N_{c,Rd}$ calculados pelo PR NBR 8800:2022 são maiores para $t_w = 4,75\text{mm}$ e $t_w = 6,3\text{mm}$. Se $\lambda_0 = 1,0$ e $t_w = 8,0\text{mm}$ ou $t_w = 9,5\text{mm}$, os valores da $N_{c,Rd}$ são iguais para o PR NBR 8800:2022 e a ABNT NBR 8800:2008. Finalmente, se $\lambda_0 = 2,0$, os valores da $N_{c,Rd}$ para cada seção são iguais entre o PR NBR 8800:2022 e a ABNT NBR 8800:2008. As Tabelas 13, 14 e 15 apresentam de forma simplificada as informações descritas acima. Destaca-se que, para $\lambda_0 =$

0,0 e $\lambda_0 = 1,0$, quanto mais esbelta a alma, maior a diferença entre a $N_{c,Rd}$ calculada pelo PR NBR 8800:2022 e pela ABNT NBR 8800:2008.

As Figuras 3 e 4 evidenciam que quanto maior a espessura da mesa (t_f) e da alma (t_w), maior a força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$), visto que a maior área da seção transversal e o maior momento de inércia contribuem para a resistência da barra submetida a compressão. Ademais, quanto menor o índice de esbeltez reduzido (λ_0), maior a $N_{c,Rd}$, em virtude de o menor comprimento da barra implicar em maior resistência. Nota-se pela inclinação dos gráficos que o menor λ_0 gera a maior variação da $N_{c,Rd}$, porque para $\lambda_0 = 2,0$ a variação é a mais sutil. Quando $\lambda_0 = 0,0$, o resultado da $N_{c,Rd}$ calculada pelo PR NBR 8800:2022 é maior para a seção testada com $t_w = 4,75\text{mm}$ e $t_f = 8,0\text{mm}$. Se $\lambda_0 = 0,0$, $t_w = 6,3\text{mm}$ e $t_f = 9,5\text{mm}$, o valor da $N_{c,Rd}$ é maior pela ABNT NBR 8800:2008. Se $\lambda_0 = 0,0$, $t_w = 8,0\text{mm}$ e $t_f = 12,5\text{mm}$, o valor da $N_{c,Rd}$ é igual. Quando $\lambda_0 = 1,0$, os valores da $N_{c,Rd}$ calculados pelo PR NBR 8800:2022 são maiores para as seções com $t_w = 4,75\text{mm}$ e $t_f = 8,0\text{mm}$, e $t_w = 6,3\text{mm}$ e $t_f = 9,5\text{mm}$. Se $\lambda_0 = 1,0$, $t_w = 8,0\text{mm}$ e $t_f = 12,5\text{mm}$, os valores da $N_{c,Rd}$ são iguais para o PR NBR 8800:2022 e a ABNT NBR 8800:2008. Finalmente, se $\lambda_0 = 2,0$, os valores da $N_{c,Rd}$ para cada seção são iguais entre o PR NBR 8800:2022 e a ABNT NBR 8800:2008. As Tabelas 13, 14 e 15 apresentam de forma simplificada as informações descritas acima. Ressalta-se que, para $\lambda_0 = 0,0$ e $\lambda_0 = 1,0$, quanto mais esbelta a mesa e a alma, maior a diferença entre a $N_{c,Rd}$ calculada pelo PR NBR 8800:2022 e pela ABNT NBR 8800:2008.

Diante do exposto, as Tabelas 13, 14 e 15 estabelecem comparações simplificadas entre os resultados da força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$) obtidos pelo PR NBR 8800:2022 e pela ABNT NBR 8800:2008 para cada seção transversal e índice de esbeltez reduzido (λ_0). As Tabelas 13, 14 e 15 resumem qual procedimento fornece a maior $N_{c,Rd}$ ou se os valores coincidem. A Tabela 13 organiza os dados quando $\lambda_0 = 0,0$, a Tabela 14 é para $\lambda_0 = 1,0$ e a Tabela 15 é sobre $\lambda_0 = 2,0$.

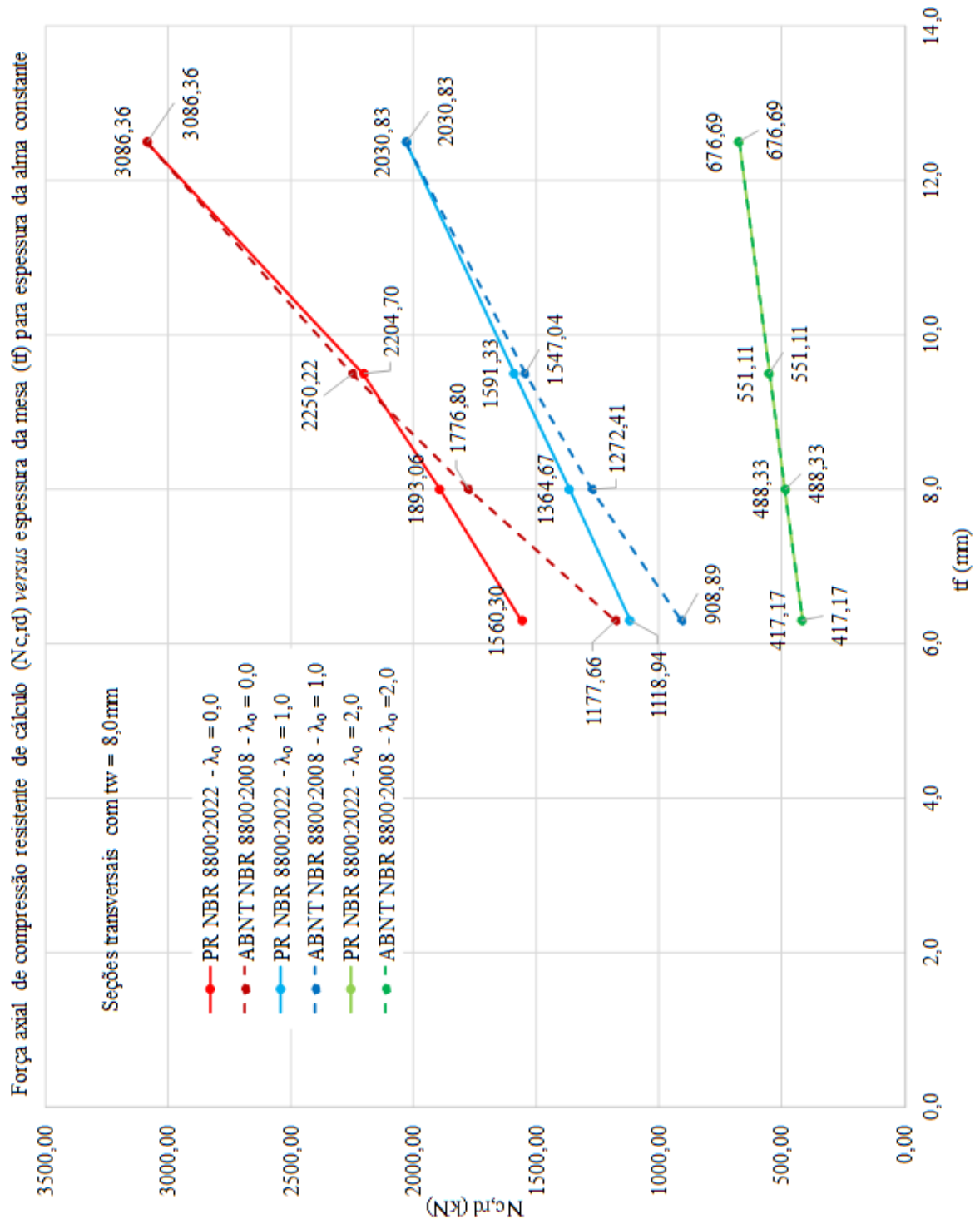


Figura 1 - Força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$) versus espessura da mesa (t_f) para espessura da alma constante.
 Fonte: Autora, 2022.

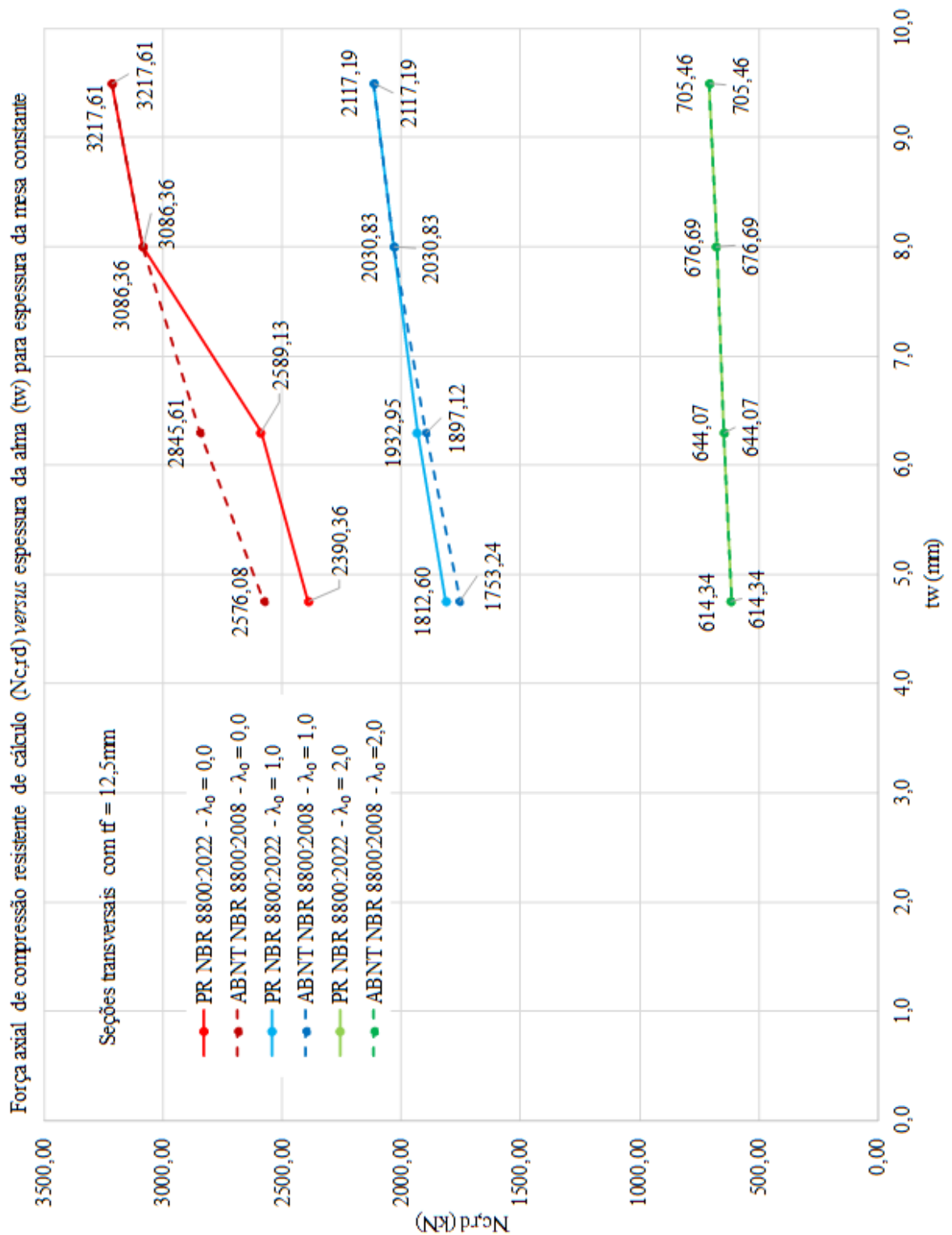


Figura 2 - Força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$) versus espessura da alma (t_w) para espessura da mesa constante.
 Fonte: Autora, 2022.

Força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$) versus espessura da mesa (t_f) para diferentes espessuras da mesa e alma

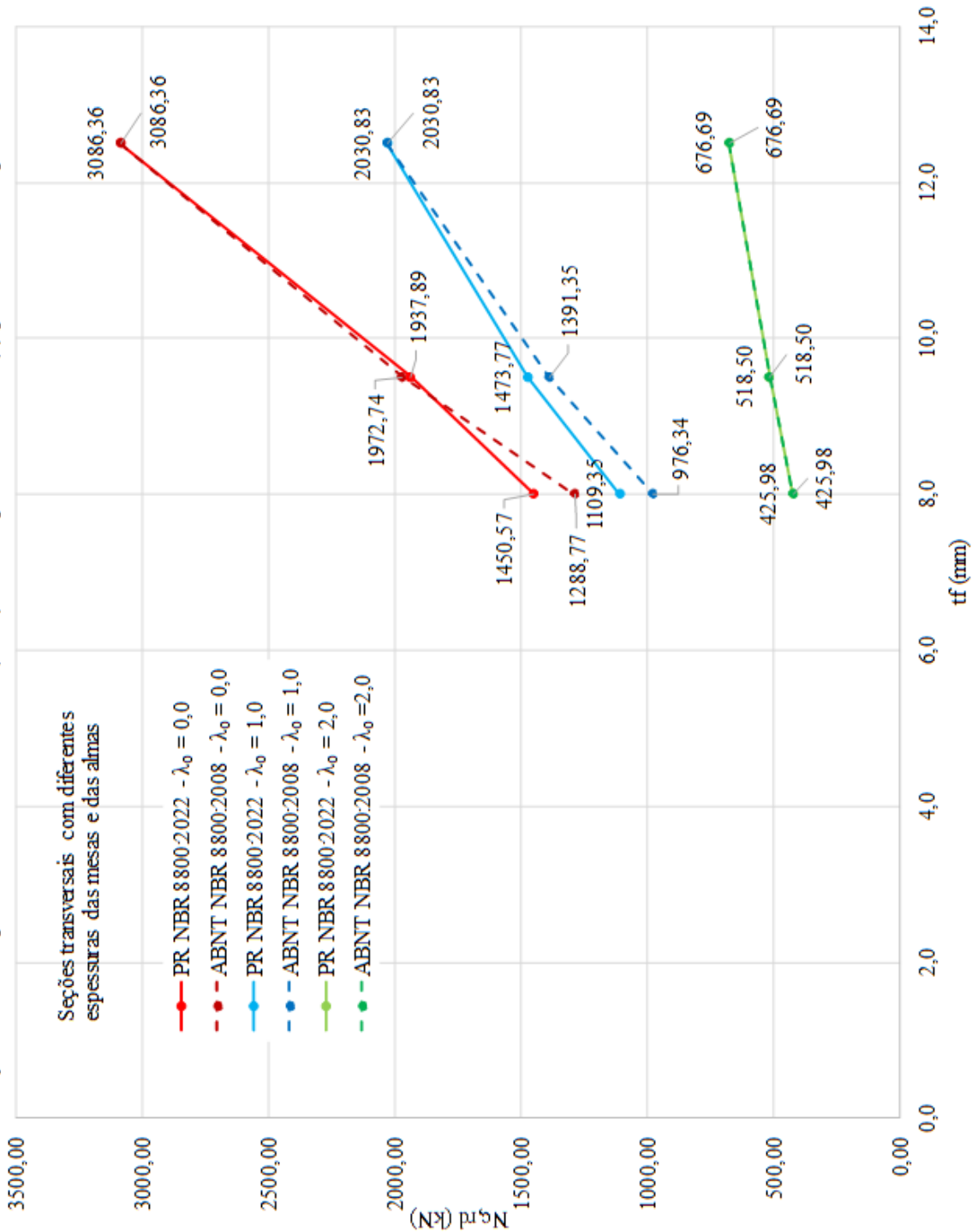


Figura 3 - Força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$) versus espessura da mesa (t_f) para diferentes espessuras da mesa e alma.

Fonte: Autora, 2022.

Força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$) versus espessura da alma (t_w) para diferentes espessuras da mesa e alma

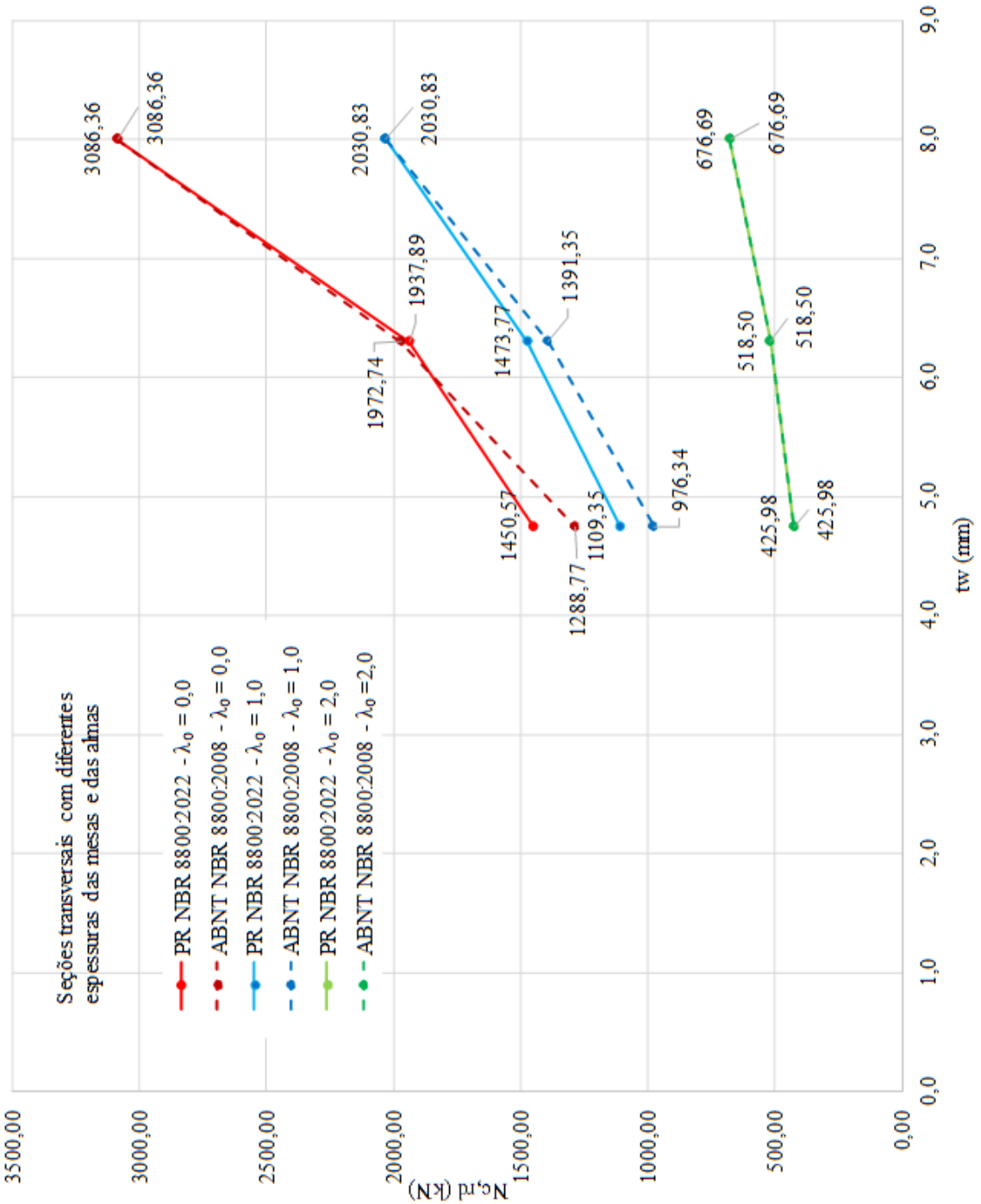


Figura 4 - Força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$) versus espessura da alma (t_w) para diferentes espessuras da mesa e alma.

Fonte: Autora, 2022.

Tabela 13 – $\lambda_0 = 0,0$ no PR NBR 8800:2022 e comparação dos valores da força axial de compressão resistente de cálculo

| Pré-determinado $\lambda_0 = 0,0$ no PR NBR 8800:2022 | | | | |
|---|----------------------|-----------|-----------|-----------|
| Comparação dos valores da força axial de compressão resistente de cálculo | | | | |
| Identificação | Seção transversal | PR > ABNT | PR = ABNT | PR < ABNT |
| Seções com alma constante e variação da espessura da mesa | | | | |
| 1º teste | CS 300x76 | | X | |
| 2º teste | PS 294x300x9,5x8,0 | | | X |
| 3º teste | PS 291x300x8,0x8,0 | X | | |
| 4º teste | PS 288x300x6,3x8,0 | X | | |
| Seções com mesa constante e variação da espessura da alma | | | | |
| 1º teste | PS 300x300x12,5x9,5 | | X | |
| 2º teste | CS 300x76 | | X | |
| 3º teste | PS 300x300x12,5x6,3 | | | X |
| 4º teste | PS 300x300x12,5x4,75 | | | X |
| Seções transversais com diferentes espessuras da mesa e da alma | | | | |
| 1º teste | CS 300x76 | | X | |
| 2º teste | PS 294x300x9,5x6,3 | | | X |
| 3º teste | PS 291x300x8,0x4,75 | X | | |

Fonte: Autora (2022).

Notas:

PR indica PR NBR 8800:2022

ABNT indica ABNT NBR 8800:2008

Tabela 14 - $\lambda_0 = 1,0$ no PR NBR 8800:2022 e comparação dos valores da força axial de compressão resistente de cálculo

| Pré-determinado $\lambda_0 = 1,0$ no PR NBR 8800:2022 | | | | |
|---|----------------------|-----------|-----------|-----------|
| Comparação dos valores da força axial de compressão resistente de cálculo | | | | |
| Identificação | Seção transversal | PR > ABNT | PR = ABNT | PR < ABNT |
| Seções com alma constante e variação da espessura da mesa | | | | |
| 1º teste | CS 300x76 | | X | |
| 2º teste | PS 294x300x9,5x8,0 | X | | |
| 3º teste | PS 291x300x8,0x8,0 | X | | |
| 4º teste | PS 288x300x6,3x8,0 | X | | |
| Seções com mesa constante e variação da espessura da alma | | | | |
| 1º teste | PS 300x300x12,5x9,5 | | X | |
| 2º teste | CS 300x76 | | X | |
| 3º teste | PS 300x300x12,5x6,3 | X | | |
| 4º teste | PS 300x300x12,5x4,75 | X | | |
| Seções transversais com diferentes espessuras da mesa e da alma | | | | |
| 1º teste | CS 300x76 | | X | |
| 2º teste | PS 294x300x9,5x6,3 | X | | |
| 3º teste | PS 291x300x8,0x4,75 | X | | |

Fonte: Autora (2022).

Notas:

PR indica PR NBR 8800:2022

ABNT indica ABNT NBR 8800:2008

Tabela 15 - $\lambda_0 = 2,0$ no PR NBR 8800:2022 e comparação dos valores da força axial de compressão resistente de cálculo

| Pré-determinado $\lambda_0 = 2,0$ no PR NBR 8800:2022 | | | | |
|---|----------------------|-----------|-----------|-----------|
| Comparação dos valores da força axial de compressão resistente de cálculo | | | | |
| Identificação | Seção transversal | PR > ABNT | PR = ABNT | PR < ABNT |
| Seções com alma constante e variação da espessura da mesa | | | | |
| 1º teste | CS 300x76 | | X | |
| 2º teste | PS 294x300x9,5x8,0 | | X | |
| 3º teste | PS 291x300x8,0x8,0 | | X | |
| 4º teste | PS 288x300x6,3x8,0 | | X | |
| Seções com mesa constante e variação da espessura da alma | | | | |
| 1º teste | PS 300x300x12,5x9,5 | | X | |
| 2º teste | CS 300x76 | | X | |
| 3º teste | PS 300x300x12,5x6,3 | | X | |
| 4º teste | PS 300x300x12,5x4,75 | | X | |
| Seções transversais com diferentes espessuras da mesa e da alma | | | | |
| 1º teste | CS 300x76 | | X | |
| 2º teste | PS 294x300x9,5x6,3 | | X | |
| 3º teste | PS 291x300x8,0x4,75 | | X | |

Fonte: Autora (2022).

Notas:

PR indica PR NBR 8800:2022

ABNT indica ABNT NBR 8800:2008

As Figuras 5, 6 e 7 ilustram que quanto maior o índice de esbeltez reduzido (λ_0), menor a força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$), porque o maior comprimento da barra implica em menor resistência sob compressão. Adicionalmente, quanto maior a espessura da mesa (t_f) e/ou espessura da alma (t_w), maior $N_{c,Rd}$, pois a maior área da seção transversal e o maior momento de inércia contribuem para a resistência da barra submetida a compressão. Constata-se que, para as diferentes seções testadas, os valores da $N_{c,Rd}$ calculados tendem a convergir com o aumento do λ_0 , visto que o grupo de pontos está mais próximo quando $\lambda_0 = 2,0$ e mais afastado quando $\lambda_0 = 0,0$. Finalmente, ao analisar simultaneamente as Figuras 5 e 6, conclui-se que a variação da espessura da mesa (t_f) afeta a resistência da barra em maior escala do que a variação da espessura da alma (t_w). Ressalta-se que as Figuras 1 e 5, e as Figuras 2 e 6 contêm as mesmas informações, mas apresentadas de modos diferentes. O mesmo é válido para as Figuras 3, 4 e 7.

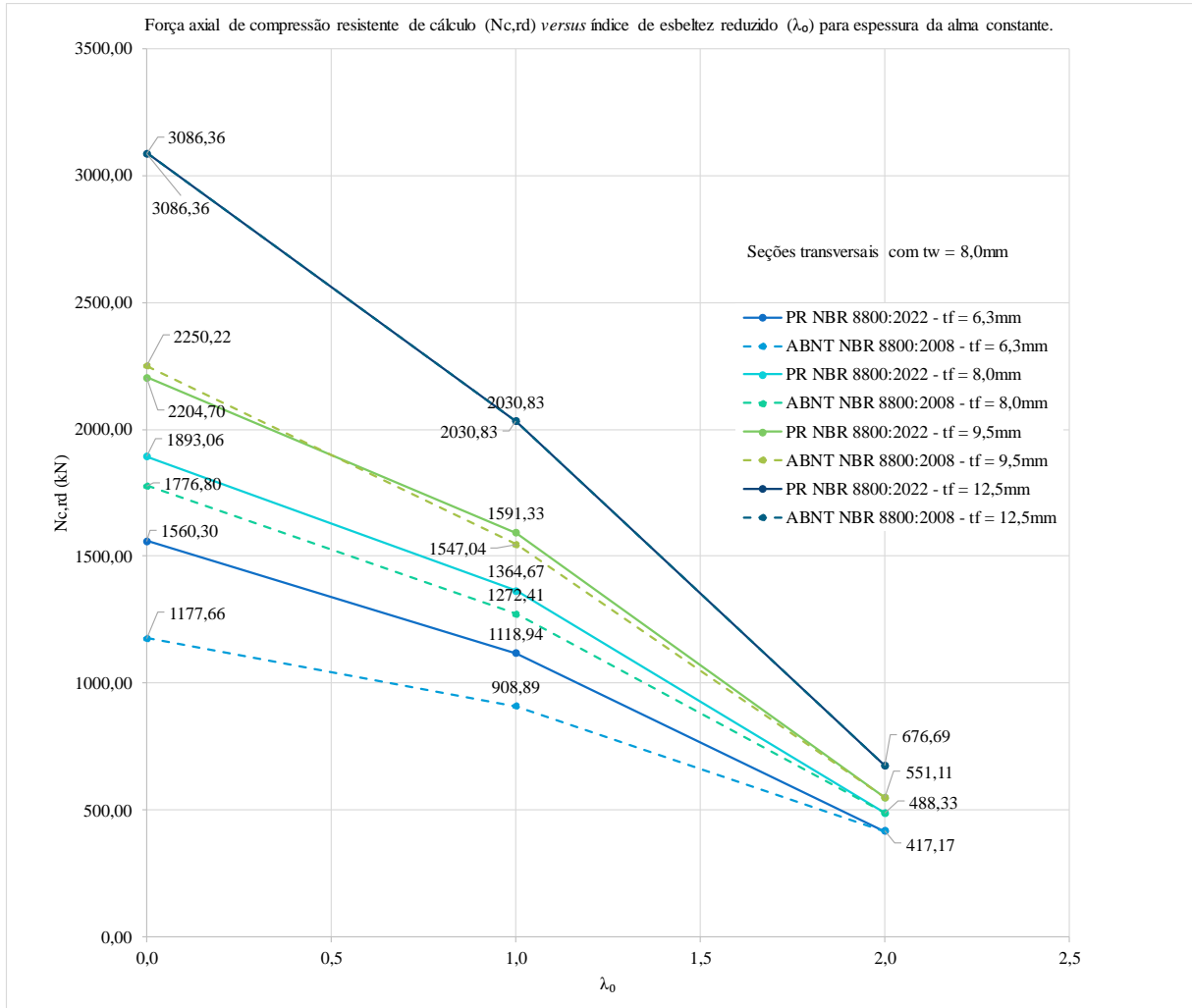


Figura 5 - Força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$) versus índice de esbeltez reduzido (λ_0) para espessura da alma constante.

Fonte: Autora, 2022.

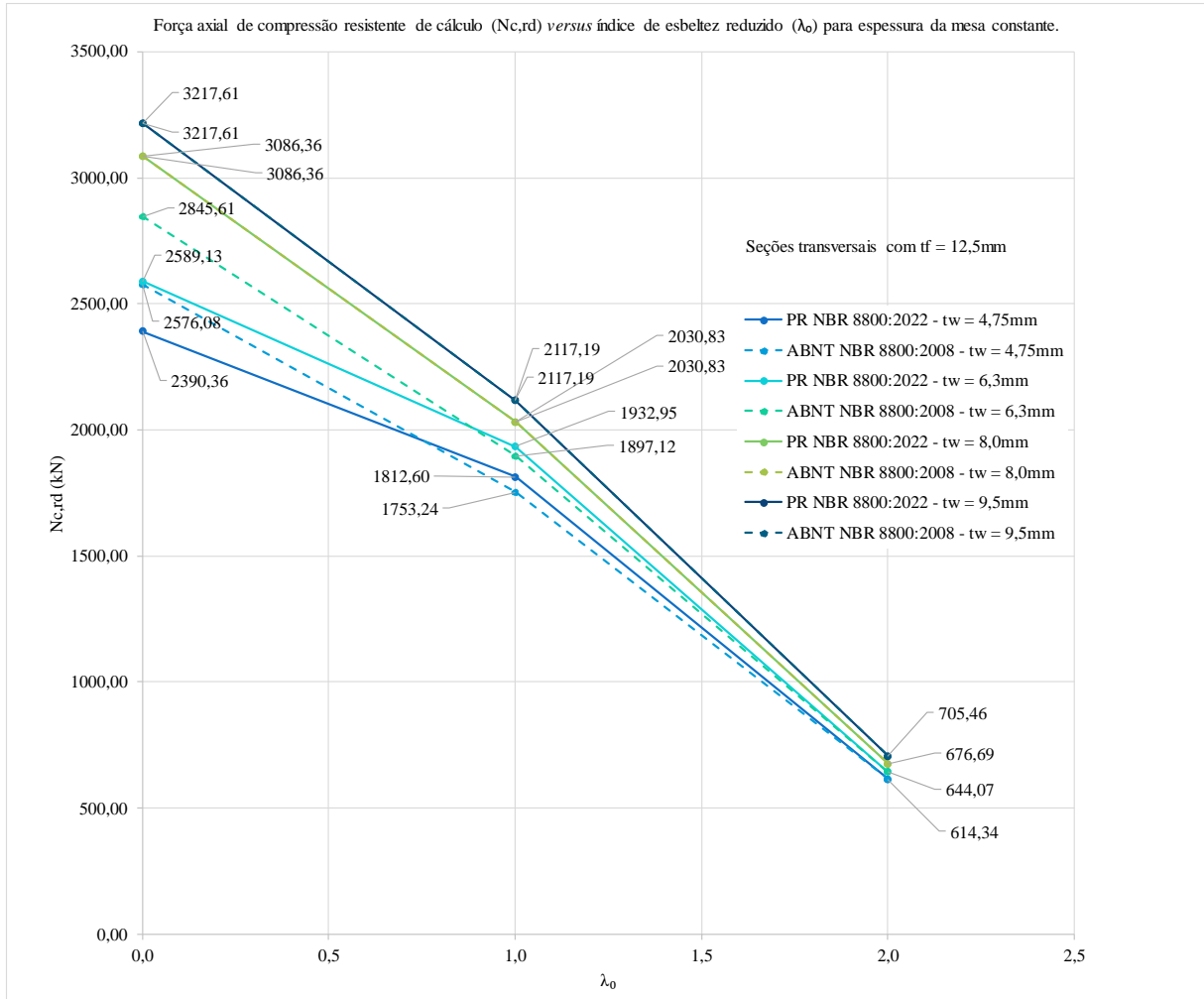


Figura 6 - Força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$) versus índice de esbeltez reduzido (λ_0) para espessura da mesa constante.
Fonte: Autora, 2022.

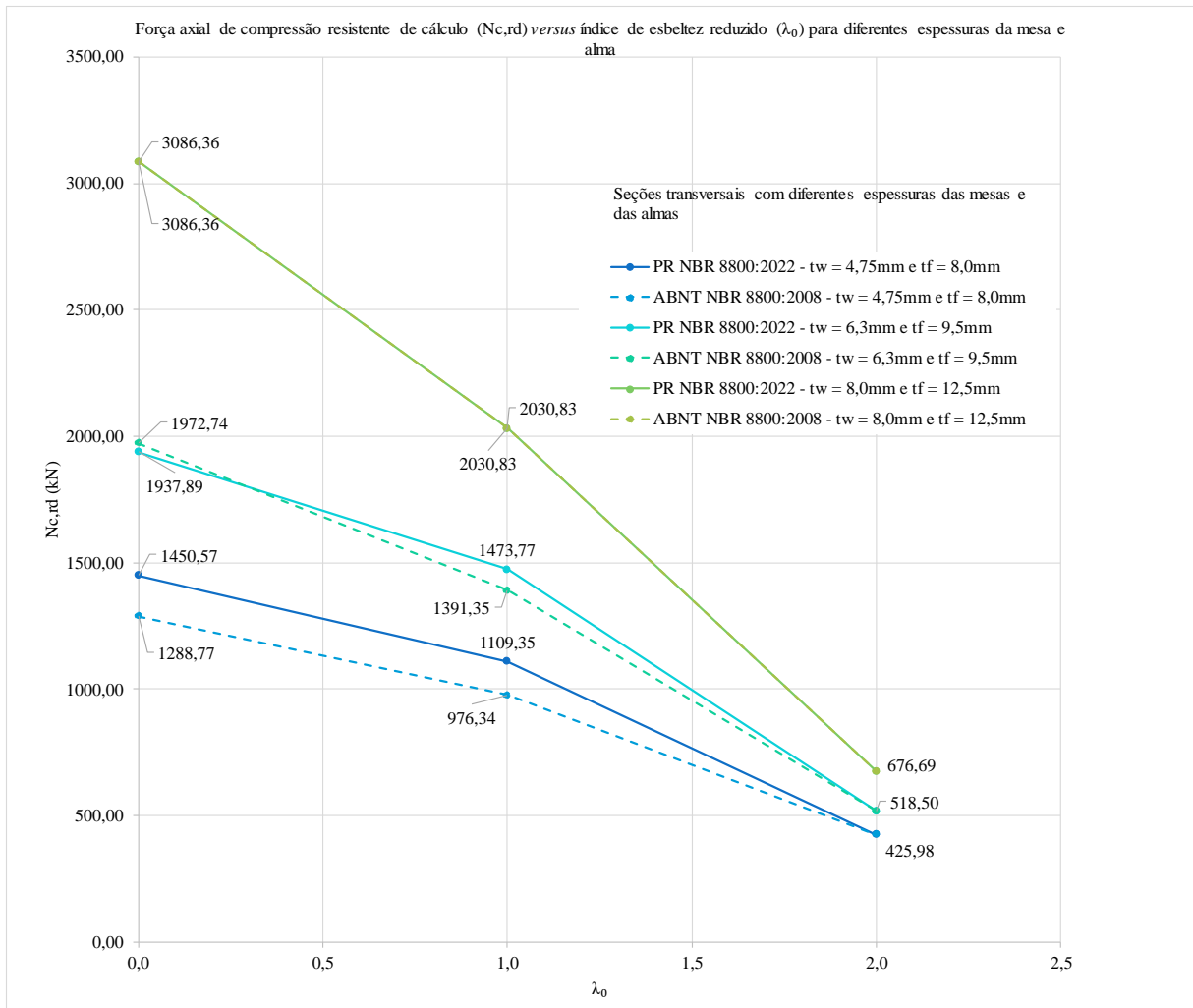


Figura 7 - Força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$) versus índice de esbeltez reduzido (λ_0) para diferentes espessuras da mesa e alma.

Fonte: Autora, 2022.

A Figura 8 aponta que quanto maior a espessura da mesa (t_f), maior a área efetiva da seção transversal (A_{ef}), pois a maior espessura do elemento implica em maior área bruta. Ademais, na ABNT NBR 8800:2008, a A_{ef} não varia com o índice de esbeltez reduzido (λ_0), porque no procedimento de cálculo a A_{ef} antecede o λ_0 . Em contrapartida, quanto maior o λ_0 , maior a A_{ef} calculada pelo PR NBR 8800:2022 para as seções com $t_f = 6,3\text{mm}$, $t_f = 8,0\text{mm}$ e $t_f = 9,5\text{mm}$. O motivo é que, no PR NBR 8800:2008, o aumento do λ_0 reduz o fator de redução associado a resistência à compressão (χ) que, por sua vez, pode aumentar a A_{ef} . Em relação a seção com $t_f = 12,5\text{mm}$, a A_{ef} calculada pelo PR NBR 8800:2022 é constante e igual a área bruta, visto que é uma seção compacta.

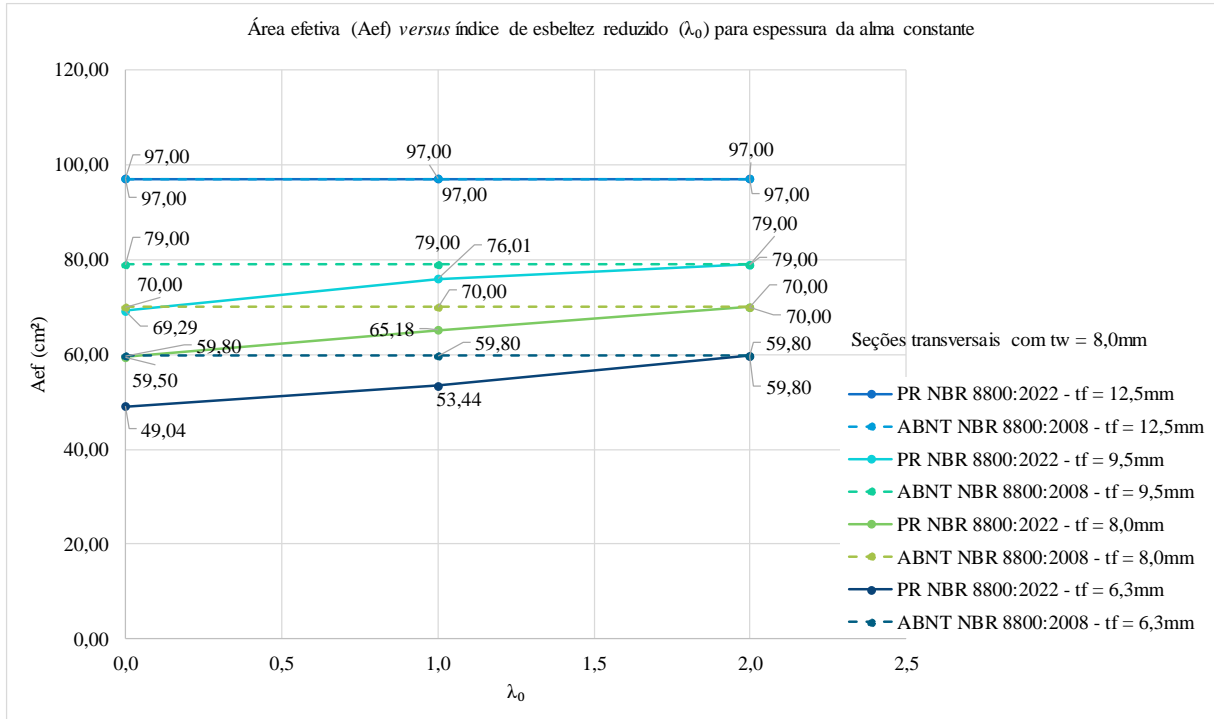


Figura 8 – Área efetiva (A_{ef}) versus índice de esbeltez reduzido (λ_0) para espessura da alma constante. Fonte: Autora, 2022.

A Figura 9 mostra que quanto maior a espessura da alma (t_w), maior a área efetiva da seção transversal (A_{ef}), pois a maior espessura do elemento implica em maior área bruta. Adicionalmente, na ABNT NBR 8800:2008, a A_{ef} não varia com o índice de esbeltez reduzido (λ_0), porque no procedimento de cálculo a A_{ef} antecede o λ_0 . Em contrapartida, quanto maior o λ_0 , maior a A_{ef} calculada pelo PR NBR 8800:2022 para as seções com $t_w = 4,75\text{mm}$ e $t_w = 6,3\text{mm}$. O motivo é que, no PR NBR 8800:2008, o aumento do λ_0 reduz o fator de redução associado a resistência à compressão (χ) que, por sua vez, pode aumentar a A_{ef} . Em relação as seções com $t_w = 8,0\text{mm}$ e $t_w = 9,5\text{mm}$, a A_{ef} calculada pelo PR NBR 8800:2022 é constante e igual a área bruta, visto que são seções compactas.

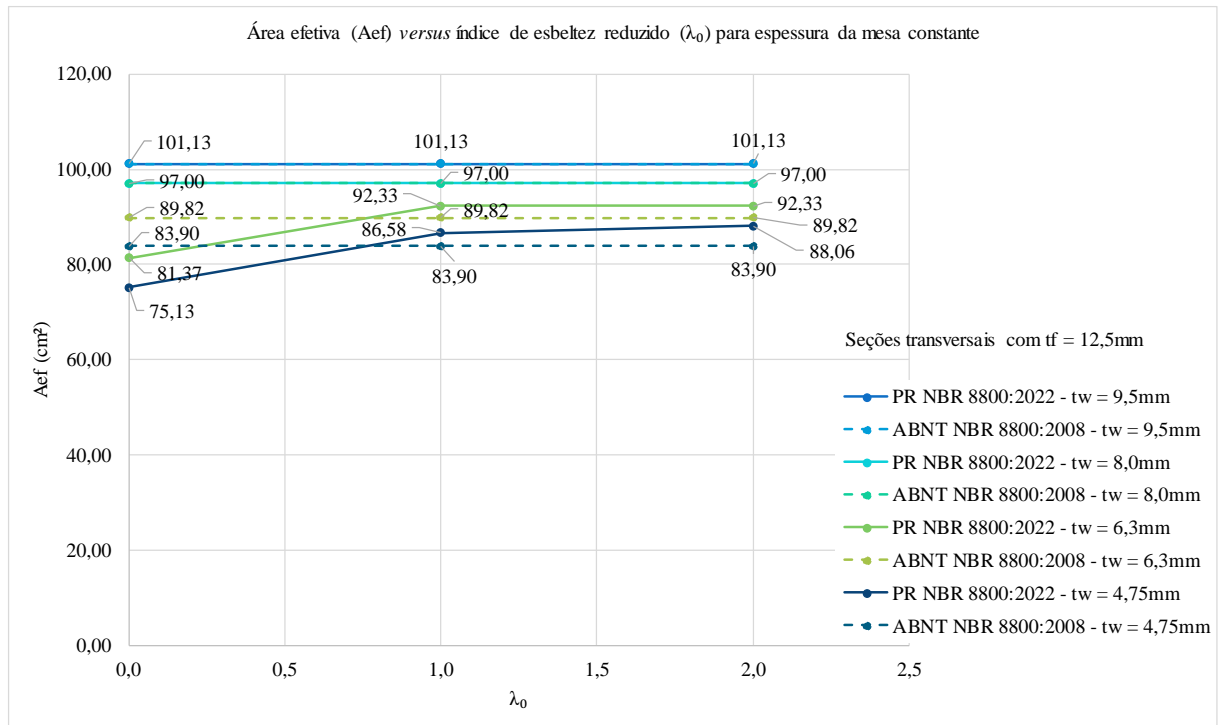


Figura 9 - Área efetiva (A_{ef}) versus índice de esbeltez reduzido (λ_0) para espessura da mesa constante. Fonte: Autora, 2022.

A Figura 10 ilustra que quanto maior a espessura da alma (t_w) e a espessura da mesa (t_f), maior a área efetiva da seção transversal (A_{ef}), pois a maior espessura dos elementos implica em maior área bruta. Além disso, na ABNT NBR 8800:2008, a A_{ef} não varia com o índice de esbeltez reduzido (λ_0), já que, no procedimento de cálculo, a A_{ef} antecede o λ_0 . Em contrapartida, quanto maior o λ_0 , maior a A_{ef} calculada pelo PR NBR 8800:2022 para a seção com $t_w = 4,75\text{mm}$ e $t_f = 8,0\text{mm}$, e para a seção com $t_w = 6,3\text{mm}$ e $t_f = 9,5\text{mm}$. O motivo é que, no PR NBR 8800:2008, o aumento do λ_0 reduz o fator de redução associado à resistência à compressão (χ) que, por sua vez, pode aumentar a A_{ef} . Em relação a seção com $t_w = 8,0\text{mm}$ e $t_f = 12,5\text{mm}$, a A_{ef} calculada pelo PR NBR 8800:2022 é constante e igual a área bruta, pois a seção é compacta.

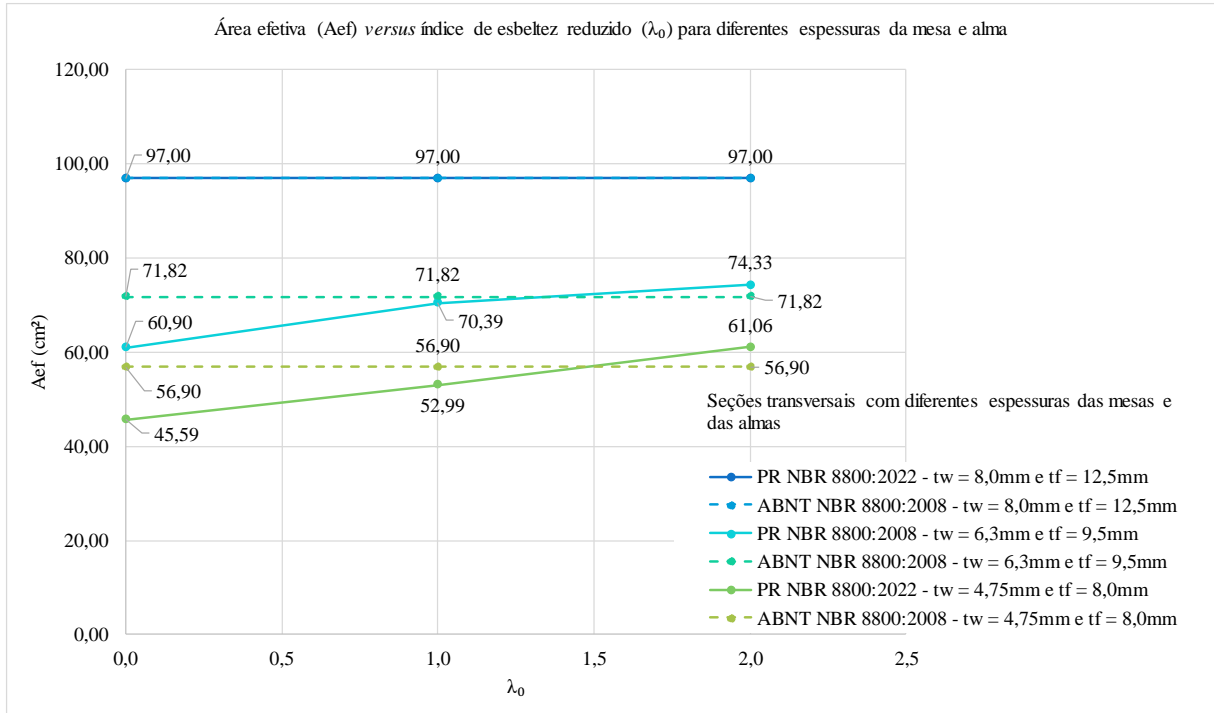


Figura 10 - Área efetiva (A_{ef}) versus índice de esbeltez reduzido (λ_0) para diferentes espessuras da mesa e alma.

Fonte: Autora, 2022.

Os dados utilizados para a elaboração dos gráficos das Figuras 11, 12 e 13 são iguais aos dados aplicados, respectivamente, nas Figuras 8, 9 e 10. Observa-se nas Figuras 11, 12 e 13 que a menor a espessura da mesa (t_f) e/ou alma (t_w) levam a menor área efetiva (A_{ef}) e área bruta (A_g). Ademais, para seções compactas, a A_{ef} é igual a A_g e os resultados calculados pelo PR NBR 8800:2022 são iguais aos da ABNT NBR 8800:2008. No geral, percebe-se que os valores encontrados pelo PR NBR 8800:2022 para A_{ef} são menores ou iguais aos resultados da ABNT NBR 8800:2008.

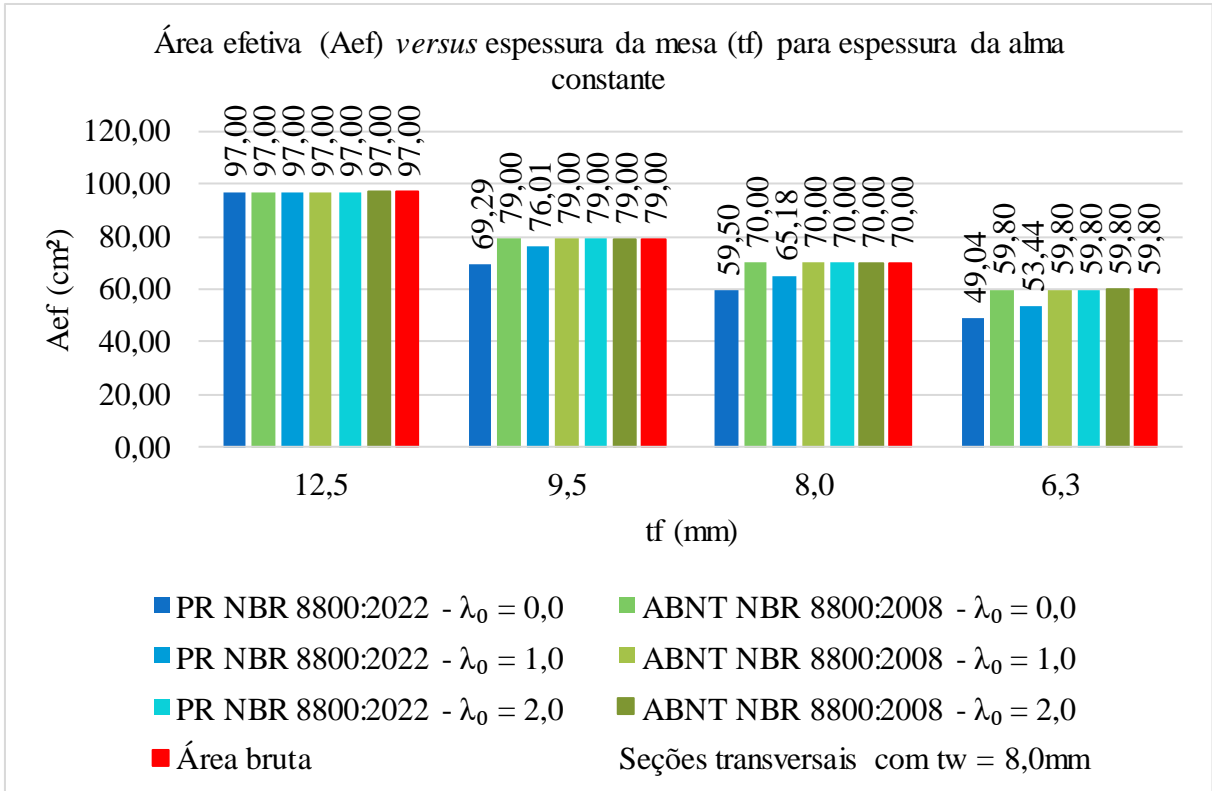


Figura 11 – Área efetiva (A_{ef}) versus espessura da mesa (t_f) para espessura da alma constante.
Fonte: Autora, 2022.

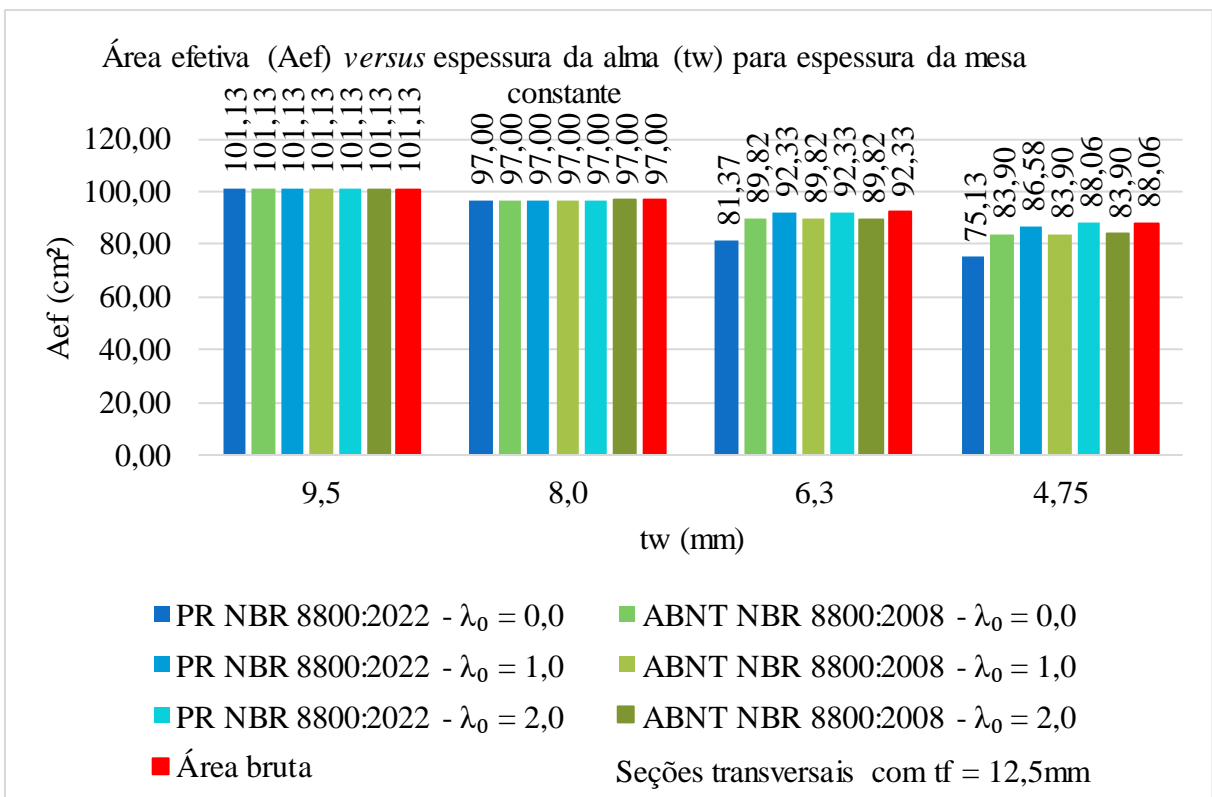


Figura 12 - Área efetiva (A_{ef}) versus espessura da alma (t_w) para espessura da mesa constante.
Fonte: Autora, 2022.

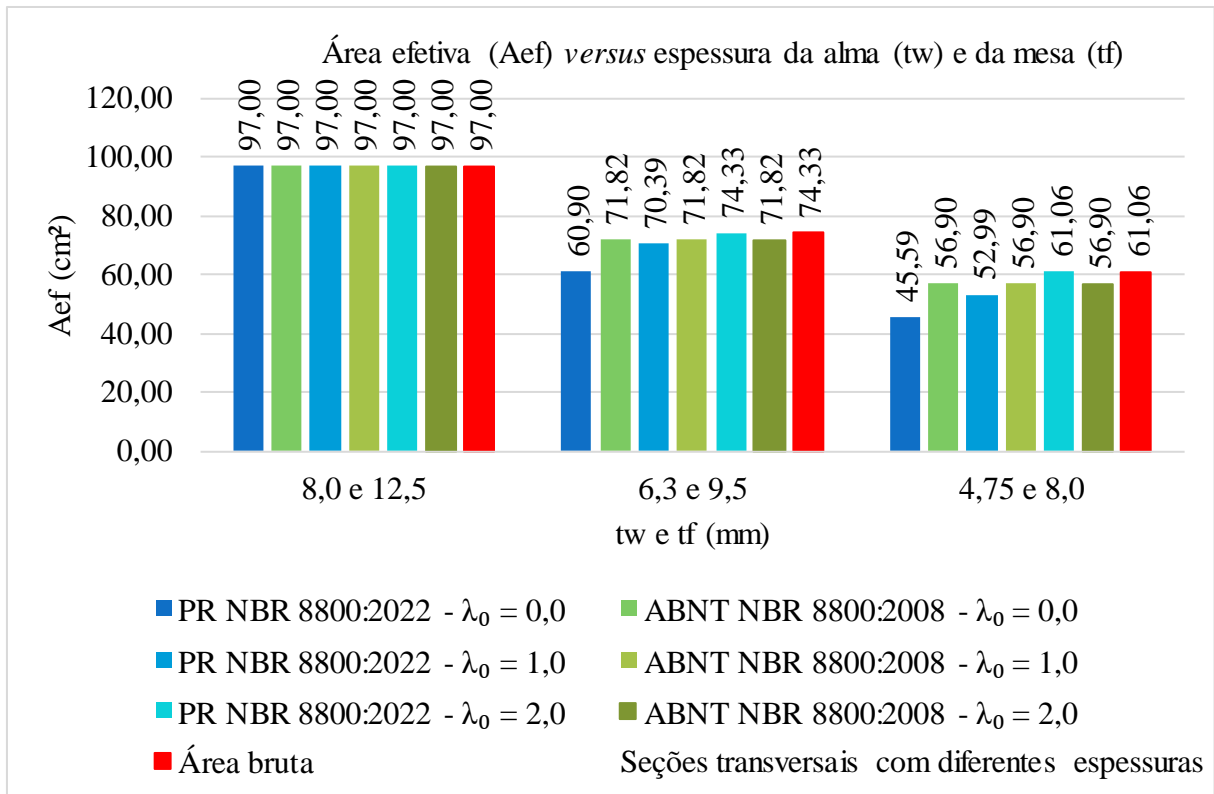


Figura 13 - Área efetiva (A_{ef}) versus espessura da alma (t_w) e da mesa (t_f).
Fonte: Autora, 2022.

As Figuras 14, 15 e 16 apontam que quanto maior o valor do índice de esbelteza reduzido (λ_0), menor o fator de redução associado à resistência à compressão (χ). Ao comparar a Figura 14 com a Figura 15, conclui-se que a alteração da espessura da mesa (t_f) afeta mais significativamente os valores de λ_0 e χ , se comparado com o efeito da alteração da espessura da alma (t_w), pois na Figura 14 os pontos estão mais afastados, enquanto na Figura 15 os pontos estão mais concentrados. Destaca-se que, para $\lambda_0 = 0,0$, os valores de χ são iguais para todas as seções transversais e para ambos procedimentos de cálculo.

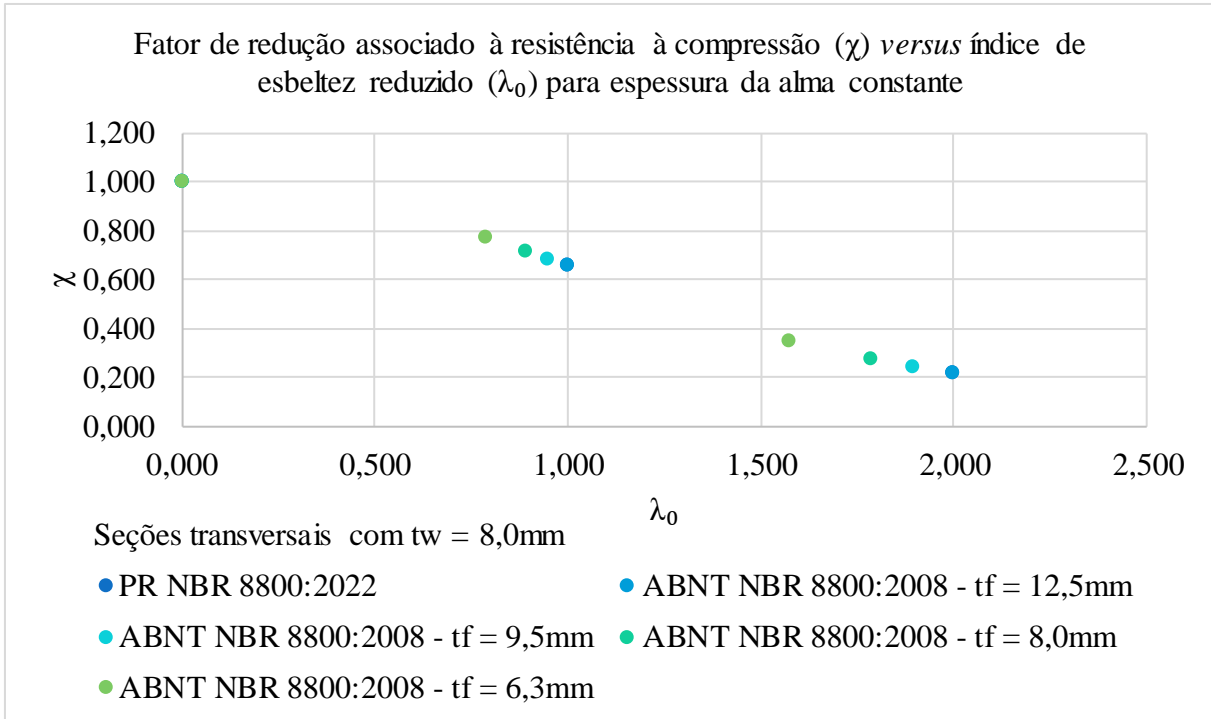


Figura 14 – Fator de redução associado à resistência à compressão (χ) versus índice de esbeltez reduzido (λ_0) para espessura da alma constante.
Fonte: Autora, 2022.

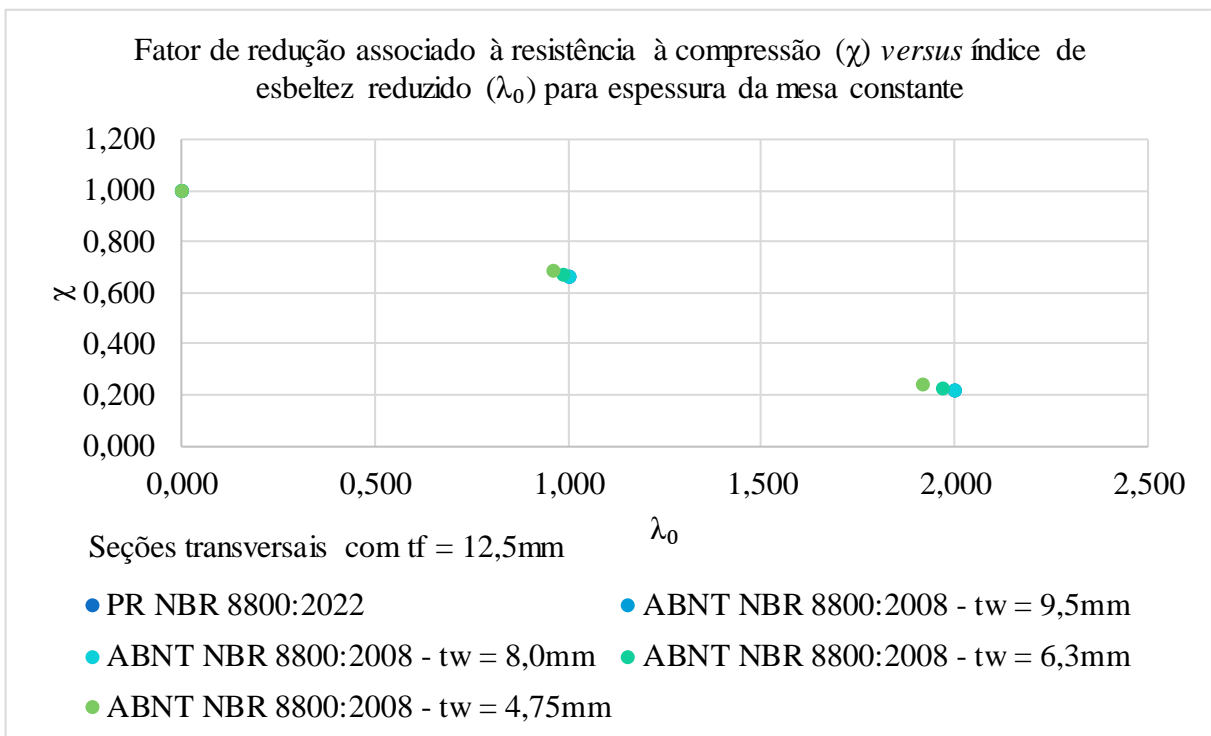


Figura 15 - Fator de redução associado à resistência à compressão (χ) versus índice de esbeltez reduzido (λ_0) para espessura da mesa constante.
Fonte: Autora, 2022.

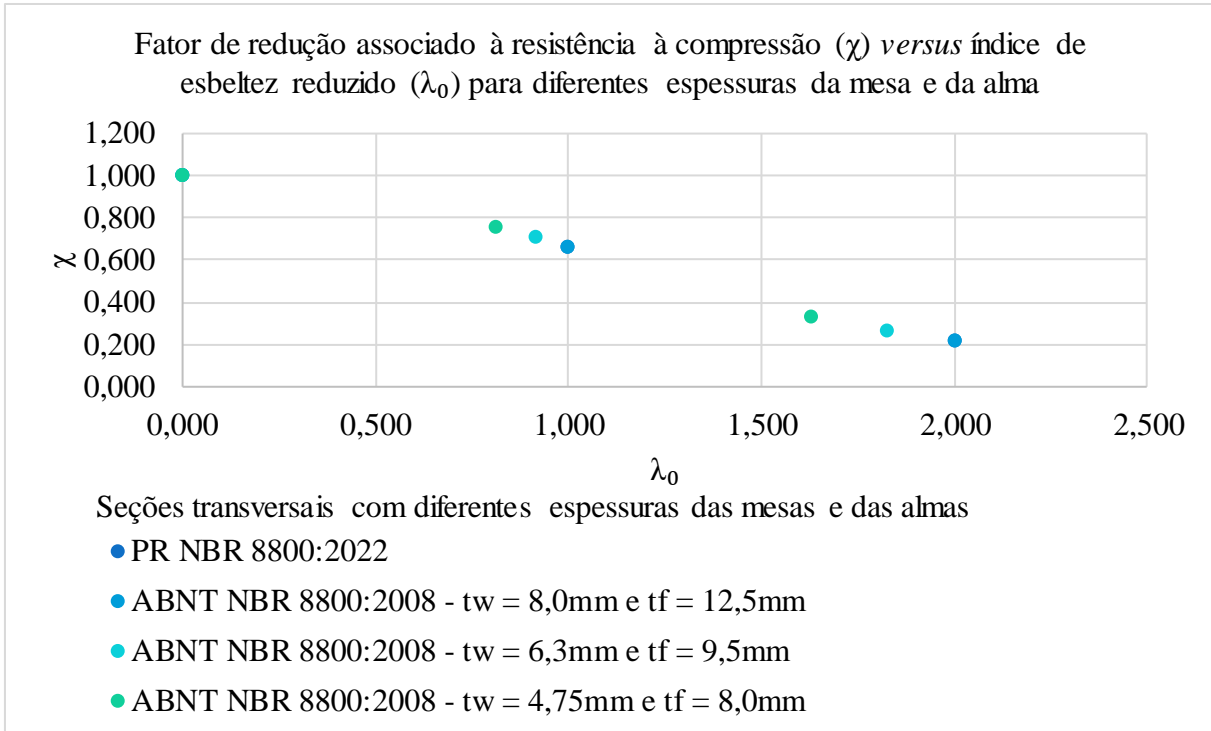


Figura 16 - Fator de redução associado à resistência à compressão (χ) versus índice de esbelteza reduzido (λ_0) para diferentes espessuras da mesa e da alma.

Fonte: Autora, 2022.

5.3 Exemplos de uso das planilhas

Ao comparar o PR NBR 8800:2022 com a ABNT NBR 8800:2008, é possível concluir que o estado-limite último que sofreu alterações mais significativas no projeto de revisão foi o dimensionamento de barras prismáticas submetidas à força axial de compressão. As planilhas eletrônicas apresentadas nos Apêndices C e D foram elaboradas para a verificação de perfis soldados comprimidos utilizando as prescrições do projeto de revisão e da norma vigente. Conforme indicado anteriormente, as Tabelas 4 a 12 contêm os resumos dos resultados liberados pelas planilhas para cada teste feito.

Dentre os testes realizados, escolheu-se a seção PS 291x300x8,0x4,75 quando $\lambda_0 = 1,0$ para exemplificar como é o dimensionamento através das planilhas eletrônicas elaboradas. Este perfil soldado possui a maior esbelteza da mesa e da alma e as dimensões dos elementos são $t_w = 4,75\text{mm}$, $h = 275\text{mm}$, $t_f = 8,0\text{mm}$ e $b_f = 300\text{mm}$. Ao fazer a razão entre a força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$) obtida pelo PR NBR 8800:2022 com a calculada pela ABNT NBR 8800:2008, tem-se como resultado 1,136. Em outras palavras, para o teste supracitado, o PR NBR 8800:2022 indica um aumento de 13,6% no resultado da $N_{c,Rd}$.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho estabelece uma comparação entre a ABNT NBR 8800:2008 e o seu projeto de revisão PR NBR 8800:2022. O estudo comparativo consiste em obter os resultados do dimensionamento de barras submetidas a força axial de compressão em perfis H soldados com dupla simetria utilizando os procedimentos de cálculo da norma vigente e do projeto de revisão. O motivo é que, dentre os Estados Limites Últimos, o dimensionamento de barras comprimidas sofreu mais alterações.

A partir das seções transversais selecionadas e dos valores pré-estabelecidos do índice de esbeltez reduzido (λ_0), as informações foram inseridas nas planilhas eletrônicas desenvolvidas ao longo da pesquisa. As planilhas, que são baseadas no método dos estados-limites, têm como intuito calcular e liberar dados de saída relevantes como a força axial de compressão resistente de cálculo da barra analisada. Destaca-se que, na norma vigente, primeiro é analisada a instabilidade local e depois a instabilidade global. Em contrapartida, no projeto de revisão, a sequência é instabilidade global e instabilidade local.

Após realizar os testes, é possível concluir que as resistências calculadas pelo projeto de revisão e pela norma vigente são iguais para todas as seções testadas quando $\lambda_0 = 2,0$. Por sua vez, se $\lambda_0 = 1,0$, a resistência obtida pelo projeto de revisão é maior ou igual ao calculado pela norma vigente dependendo das dimensões da seção transversal. Finalmente, para $\lambda_0 = 0,0$, a razão entre as resistências do projeto de revisão e da norma vigente pode ser menor, igual ou maior do que 1,0 dependendo da seção. Estas informações são apresentadas nas figuras e tabelas da pesquisa.

Para refinar o estudo, sugere-se analisar mais seções transversais e valores de índice de esbeltez reduzido para aumentar a quantidade de pontos dos gráficos. Desta forma, a relação entre os parâmetros e os comportamentos dos gráficos ficam mais nítidos e precisos.

7. BIBLIOGRAFIA

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA E CONSULTORIA ESTRUTURAL – ABECE. *Avanços na revisão da NBR 8800*. 2021. Disponível em: <<https://site.abece.com.br/avancos-na-revisao-da-nbr-8800/>>. Acesso em: 24 jun. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NB-1952 (revisada em 1986): Cálculo e execução de estruturas de aço (edifícios)*. Rio de Janeiro, 1952.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6120:1980: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações*. Rio de Janeiro, 1980.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8800:1986: Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios*. Rio de Janeiro, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14323:1999: Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio*. Rio de Janeiro, 1999.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8800:2008: Projetos de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios*. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14762:2010: Dimensionamento de estruturas de aço constituída por perfis formados a frio*. Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5884:2013: Perfil I estrutural de aço soldado por arco elétrico – Requisitos gerais*. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118:2014: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento*. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15279:2015: Perfis estruturais de aço soldados por alta frequência (eletrofusão) – Perfis I, H e T - Requisitos*. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6120:2019: Ações para o cálculo de estruturas de edificações*. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *PR NBR 8800:2022: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações*. Projeto de revisão, versão fevereiro de 2022. Rio de Janeiro, 2022.
- AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. *AISC-LRFD-1986: Load and resistance factor design specification for structural steel buildings*. Chicago, USA, 1986.
- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE – AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. *ANSI/AISC 360-05: Specification for structural steel buildings*. Chicago, USA, 2005.
- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE – AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. *ANSI/AISC 303-16: Code of standard practice for steel buildings and bridges*. Chicago, USA, 2016.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE – AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. *ANSI/AISC 360-16: Specification for structural steel buildings*. Chicago, USA, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM A325-04b: Standard specification for structural bolts, steel, heat treated, 120/105 ksi minimum tensile strength*. USA, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM A490-04a: Standard specification for structural bolts, steel, heat treated, 150 ksi minimum tensile strength*. USA, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM A307-14: Standard specification for carbon steel bolts, studs, and threaded rod 60000 PSI tensile strength*. USA, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM F3125/F3125M-15a: Standard specification for high strength structural bolts, steel and alloy steel, heat treated, 120 ksi (830 MPa) and 150 ksi (1040 MPa) minimum tensile strength, inch and metric dimensions*. USA, 2015.

AMERICAN WELDING SOCIETY. *AWS WI:2000. Welding inspection handbook*. USA, 2000.

AMERICAN WELDING SOCIETY. *AWS D1.1/D1.1M:2020. Structural welding code - Steel*. USA, 2020.

BELLEI, Ildony Hélio (Rev.); BELLEI, Humberto N. *Edifícios de pequeno porte estruturados em aço*. 4. ed. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil/Centro Brasileiro da Construção em Aço, 2011. 107 p. + CD-ROM (Manual de construção em aço)

BELLEI, Ildony H.; PINHO, Fernando O.; PINHO, Mauro O. *Edifícios de múltiplos andares em aço*. 2. ed. São Paulo: Pini, 2008. 556p.

CALDAS, Rodrigo Barreto. Entrevistadora: Lídia de Paula Martins. Belo Horizonte. 2022.

CANADIAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. *CAN/CSA-S 16.1:1984: Steel structures for buildings – limit states design*. Rexdale, Ontario, Canada, 1984.

CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO - CBCA. *A evolução da construção em aço no Brasil*. 2015a. Disponível em: <<http://www.cbca-acobrasil.org.br/site/noticias-detalhes.php?cod=7074>>. Acesso em: 26 jul. 2022.

CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO - CBCA. *O aço em edifícios multiandares*. 2015b. Disponível em: <<http://www.cbca-acobrasil.org.br/noticias-detalhes.php?cod=7119>>. Acesso em: 26 jul. 2022.

CSI KNOWLEDGE BASE. *Technical knowledge base*. 2015. Disponível em: <<https://wiki.csiamerica.com/display/kb/Home>>. Acesso em: 26 jul. 2022.

DEUTSCHE INDUSTRIE NORMEN. *DIN 4114 (1952): Berechnungsgundlagen für stabilitätsfälle in stahlbau*. Knickung, Kippung, Beulung, Germany, 1952.

DIAS, Luís Andrade de Mattos. *Estruturas de aço: conceitos, técnicas e linguagem*. 5. ed. São Paulo: Zigurate, 2006. 218 p.

EUROPEAN CONVENTION FOR CONSTRUCTIONAL STEEL WORK. *ECCS (1976): Manual on the stability of steel structures*. Committee 8, 2^a. Ed. Europe, 1976.

FAKURY, Ricardo Hallal; SILVA, Ana Lydia Reis de Castro; CALDAS, Rodrigo Barreto. *Dimensionamento de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto*. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016. 496p.

FAKURY, Ricardo Hallal. *Sobre a revisão da norma brasileira de projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto, a NBR 8800*. Rem: Revista Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, São Paulo, v. 60, n. 2, p.233-239, abr./jun. 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0370-44672007000200005>>. Acesso em: 25 jun. 2022.

GESCHWINDNER, L.F.; TROEMNER, M. *Notes on the AISC 360-16 Provisions for Slender Compression Elements in Compression Members*. Engineering Journal, AISC, Vol. 53, No. 3, pp. 137–146, 2016.

PEKÖZ, T. *Development of a Unified Approach to the Design of Cold-Formed Steel Members*. AISI, Washington, DC, 1987.

RESEARCH COUNCIL ON STRUCTURAL CONNECTIONS. *Specification for structural joints using ASTM A325 or ASTM A490 bolts*. USA, 2004.

USIMINAS. *Catálogos de produtos: Chapas grossas*. 2021. Disponível em: <<https://www.usiminas.com/catalogos/>>. Acesso em: 10 jun. 2022.

VON KÁRMÁN, T.; SECHLER, E.E.; DONNELL, L.H. *The Strength of Thin Plates in Compression*. Transactions, ASME, Vol. 54, 1932.

WINTER, G. *Strength of Thin Steel Compression Flanges*. Transactions, ASCE, Vol. 112, p. 547, 1947.

ZIEMIAN, R.D. *Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures*. 6th Ed., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2010.

8. APÊNDICES

APÊNDICE A – Formulário para barras prismáticas submetidas à força axial de compressão conforme prescrições do PR NBR 8800:2022

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 E I_x}{(L_x)^2}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(L_y)^2}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(L_z)^2} + G J \right]$$

$$r_0 = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2}$$

$$N_e \leq \begin{cases} N_{ex} \\ N_{ey} \\ N_{ez} \end{cases}$$

$$\lambda_{max} = \frac{L}{r} = \pi \sqrt{\frac{A_g E}{N_e}} \leq 200$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A_g f_y}{N_e}}$$

$$\lambda_0 \leq 1,5 \rightarrow \chi = 0,658^{(\lambda_0)^2}$$

$$\lambda_0 > 1,5 \rightarrow \chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2}$$

$$Mesa \rightarrow \left(\frac{b}{t}\right) = \frac{b_f}{2 t_f} \rightarrow \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 0,64 \sqrt{\frac{E}{(f_y / k_c)}}$$

$$0,35 \leq k_c = \frac{4}{\sqrt{h/t_w}} \leq 0,76$$

$$\text{Alma} \rightarrow \left(\frac{b}{t}\right) = \frac{d - 2 t_f}{t_w} \rightarrow \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\text{Alma e mesa} \rightarrow \left(\frac{b}{t}\right) \leq \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} \rightarrow b_{ef} = b \rightarrow A_{ef} = A_g$$

$$\text{Mesa} \rightarrow \left(\frac{b}{t}\right) > \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} \rightarrow \begin{cases} \left(\frac{b}{t}\right) \leq \frac{\left(\frac{b}{t}\right)_{lim}}{\sqrt{\chi}} \rightarrow b_{ef} = b \\ \left(\frac{b}{t}\right) > \frac{\left(\frac{b}{t}\right)_{lim}}{\sqrt{\chi}} \rightarrow b_{ef} = b \left(1 - C_1 \sqrt{\frac{\sigma_{el}}{\chi f_y}}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{el}}{\chi f_y}} \end{cases}$$

$$\text{Alma} \rightarrow \left(\frac{b}{t}\right) > \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} \rightarrow \begin{cases} \left(\frac{b}{t}\right) \leq \frac{\left(\frac{b}{t}\right)_{lim}}{\sqrt{\chi}} \rightarrow b_{ef} = b \\ \left(\frac{b}{t}\right) > \frac{\left(\frac{b}{t}\right)_{lim}}{\sqrt{\chi}} \rightarrow b_{ef} = b \left(1 - C_1 \sqrt{\frac{\sigma_{el}}{\chi f_y}}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{el}}{\chi f_y}} \end{cases}$$

$$\sigma_{el} = \left(C_2 \frac{(b/t)_{lim}}{(b/t)}\right) f_y$$

$$\text{Mesa} \rightarrow \text{Elemento AL} \rightarrow \begin{cases} C_1 = 0,22 \\ C_2 = 1,49 \end{cases}$$

$$\text{Alma} \rightarrow \text{Elemento AA} \rightarrow \begin{cases} C_1 = 0,18 \\ C_2 = 1,31 \end{cases}$$

$$\text{Alma e mesa} \rightarrow \left(\frac{b}{t}\right) \leq \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} \rightarrow A_{ef} = A_g$$

$$\text{Alma e/ou mesa} \rightarrow \left(\frac{b}{t}\right) > \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} \rightarrow A_{ef} = \sum (b_{ef} t)$$

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi A_{ef} f_y}{\gamma_{a_1}}$$

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd}$$

Na qual,

A_{ef} : Área efetiva da seção transversal da barra;

A_g : Área bruta da seção transversal;

b_{ef} : Largura efetiva;

b_f : Largura da mesa;

C_w : Constante de empenamento da seção transversal;

d : Altura total da seção transversal;

E : Módulo de elasticidade do aço;

f_y : Resistência ao escoamento do aço;

G : Módulo de elasticidade transversal do aço;

I : Momento de inércia;

J : Constante de torção;

L : Comprimento destravado;

t_f : Espessura da mesa;

t_w : Espessura da alma;

r_o : Raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento;

r_x ; r_y : Raios de giração em relação aos eixos centrais x e y ;

N_e : Força axial de instabilidade elástica;

N_{ex} , N_{ey} , N_{ez} : Força axial de instabilidade elástica por flexão em relação ao eixo x, por flexão em relação ao eixo y, e por torção em relação ao eixo z, respectivamente;

$N_{c,Rd}$: Força axial de compressão resistente de cálculo;

$N_{c,Sd}$: Força axial de compressão solicitante de cálculo;

x_o , y_o : Coordenadas do centro de cisalhamento na direção dos eixos centrais x e y;

σ_{el} : Tensão de instabilidade local elástica;

γ_{a1} : Coeficiente de ponderação da resistência, igual a 1,10;

λ_o : Índice de esbeltez reduzido;

χ : Fator de redução associado à resistência à compressão.

APÊNDICE B – Formulário para barras prismáticas submetidas à força axial de compressão conforme prescrições da ABNT NBR 8800:2008

$$Mesa \rightarrow \begin{cases} \left(\frac{b}{t}\right) = \frac{b_f}{2 t_f} \\ \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 0,64 \sqrt{\frac{E}{(f_y / k_c)}} \\ \left(\frac{b}{t}\right)_{sup} = 1,17 \sqrt{\frac{E}{(f_y / k_c)}} \end{cases}$$

$$Mesa \rightarrow \begin{cases} \left(\frac{b}{t}\right) \leq \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} \rightarrow Q_s = 1,0 \\ \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} < \left(\frac{b}{t}\right) \leq \left(\frac{b}{t}\right)_{sup} \rightarrow Q_s = 1,415 - 0,65 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{k_c E}} \\ \left(\frac{b}{t}\right)_{sup} < \left(\frac{b}{t}\right) \rightarrow Q_s = \frac{0,90 E k_c}{f_y \left(\frac{b}{t}\right)^2} \end{cases}$$

$$0,35 \leq k_c = \frac{4}{\sqrt{h / t_w}} \leq 0,76$$

$$Alma \rightarrow \begin{cases} \left(\frac{b}{t}\right) = \frac{d - 2 t_f}{t_w} \\ \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \end{cases}$$

$$Alma \left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{b}{t}\right) \leq \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} \rightarrow Q_a = 1,0 \\ \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} < \left(\frac{b}{t}\right) \rightarrow b_{ef} = 1,92 t \sqrt{\frac{E}{f_y}} \left[1 - \frac{0,34}{\left(\frac{b}{t}\right)} \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right] \leq b \rightarrow Q_a = \frac{A_g - \sum(b - b_{ef}) t}{A_g} \end{array} \right.$$

$$Q = Q_s Q_a$$

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x L_x)^2}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_y)^2}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + G J \right]$$

$$r_0 = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2}$$

$$N_e \leq \begin{cases} N_{ex} \\ N_{ey} \\ N_{ez} \end{cases}$$

$$\lambda_{max} = \frac{K L}{r} = \pi \sqrt{\frac{A_g E}{N_e}} \leq 200$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_e}}$$

$$\lambda_0 \leq 1,5 \rightarrow \chi = 0,658^{(\lambda_0)^2}$$

$$\lambda_0 > 1,5 \rightarrow \chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2}$$

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}}$$

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd}$$

Na qual,

A_{ef} : Área efetiva da seção transversal da barra;

A_g : Área bruta da seção transversal;

b_{ef} : Largura efetiva;

b_f : Largura da mesa;

C_w : Constante de empenamento da seção transversal;

d : Altura total da seção transversal;

E : Módulo de elasticidade do aço;

f_y : Resistência ao escoamento do aço;

G : Módulo de elasticidade transversal do aço;

I : Momento de inércia;

J : Constante de torção;

$K L$: Comprimento de flambagem;

L : Comprimento destravado;

Q : Fator de redução total associado à flambagem local;

Q_a ; Q_s : Fatores de redução que levam em conta a flambagem local de elementos AA e AL, respectivamente;

t_f : Espessura da mesa;

t_w : Espessura da alma;

r_0 : Raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento;

r_x ; r_y : Raios de giração em relação aos eixos centrais x e y;

N_e : Força axial de flambagem elástica;

N_{ex} , N_{ey} , N_{ez} : Força axial de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo x, por flexão em relação ao eixo y, e por torção em relação ao eixo z;

$N_{c,Rd}$: Força axial de compressão resistente de cálculo;

$N_{c,sd}$: Força axial de compressão solicitante de cálculo;

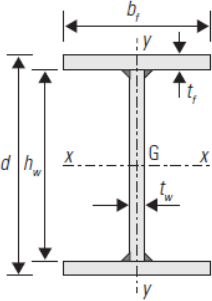
x_o, y_o : Coordenadas do centro de cisalhamento na direção dos eixos centrais x e y;

γ_{a1} : Coeficiente de ponderação da resistência, igual a 1,10;

λ_o : Índice de esbeltez reduzido;

χ : Fator de redução associado à resistência à compressão.

APÊNDICE C – Barra de aço submetida à força axial de compressão conforme prescrições do PR NBR 8800:2022

| BARRA SUBMETIDA À FORÇA AXIAL DE COMPRESSÃO PR NBR 8800:2022 | | |
|--|-------------------------------|--------------------|
| Propriedades mecânicas, perfil, dimensões e propriedades geométricas | | |
| <u>Propriedades mecânicas:</u> | | |
| Aço estrutural | USI CIVIL 350 | |
| Tensão de escoamento (f_y) | 35 | kN/cm ² |
| Módulo de elasticidade (E_a) | 20000 | kN/cm ² |
| Mód. elasticidade transv. (G) | 7700 | kN/cm ² |
| <u>Perfil:</u> | | |
| Soldado | tw = 4,75mm e tf = 8mm | |
| <u>Dimensões do perfil:</u> | | |
| Altura (d) | 291 | mm |
| Altura plana da alma (h) | 275,0 | mm |
| Espessura da alma (t_w) | 4,75 | mm |
| Largura da mesa (b_f) | 300 | mm |
| Espessura da mesa (t_f) | 8 | mm |
| <u>Propriedades geométricas:</u> | | |
| Posição y do centroide | 145,5 | mm |
| Área (Ag) | 61,1 | cm ² |
| Massa | 47,9 | kg/m |
| Inércia x (I_x) | 10436 | cm ⁴ |
| Raio de giração x (r_x) | 13,07 | cm |
| Inércia y (I_y) | 3600 | cm ⁴ |
| Raio de giração y (r_y) | 7,68 | cm |
| Inércia torção (J) | 11 | cm ⁴ |
| Coef. Empenamento (C_w) | 720801 | cm ⁶ |
|  | | |
| d = altura total h_w = altura interna da alma b_f = largura das mesas t_f = espessura das mesas t_w = espessura da alma A_g = área bruta I_x = momento de inércia em relação ao eixo x W_x = módulo de resistência elástico em relação ao eixo x r_x = raio de giração em relação ao eixo x Z_x = módulo de resistência plástica em relação ao eixo x I_y = momento de inércia em relação ao eixo y W_y = módulo de resistência elástico em relação ao eixo y r_y = raio de giração em relação ao eixo y Z_y = módulo de resistência plástica em relação ao eixo y J = constante de torção C_w = constante de empenamento | | |
| Consideração inicial, comprimentos e esforço solicitante de cálculo | | |
| <u>Consideração inicial:</u> | | |
| Pré-determinação do índice de esbeltez reduzido (λ_0) | 1,0 | |
| <u>Comprimentos:</u> | | |
| Comprimento total da barra | 576,65 cm | |
| Comprimento destravado associado a flexão em x (L_x) | 576,65 cm | |
| Comprimento destravado associado a flexão em y (L_y) | 576,65 cm | |
| Comprimento destravado associado a flexão em z (L_z) | 576,65 cm | |
| <u>Esforço solicitante de cálculo:</u> | | |
| Normal de compressão solicitante de cálculo (N_{sd}) | 100,00 kN | |

| Instabilidade global | | |
|--|----------------|--------------------|
| <i>Forças axiais de instabilidade elástica (N_{ex}, N_{ey}, N_{ez}, N_e)</i> | | |
| $N_{ex} = \frac{\pi^2 E I_x}{(L_x)^2} \quad N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(L_y)^2} \quad N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(L_z)^2} + GJ \right] \quad r_0 = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2}$ | | |
| N_{ex} | 6195,31 | kN |
| N_{ey} | 2137,19 | kN |
| N_{ez} | 2238,25 | kN |
| N_e | 2137,19 | kN |
| NÃO É NECESSÁRIO VERIFICAR N_{ez}, POIS C_w NÃO NULA E $L_z \leq L_y$ | | |
| <i>Esbeltez máxima (λ_{max})</i> | | |
| $\lambda_{max} = \frac{L}{r} = \pi \sqrt{\frac{A_g E}{N_e}} \leq 200 \quad N_e \leq \begin{cases} N_{ex} \\ N_{ey} \\ N_{ez} \end{cases}$ | | |
| λ_{max} | 75,10 | OK |
| <i>Força axial de instabilidade elástica (N_e), índice de esbeltez reduzido (λ_0) e fator de redução associado à resistência à compressão (χ)</i> | | |
| $\lambda_0 = \sqrt{\frac{A_g f_y}{N_e}} \quad \lambda_0 \leq 1,5 \rightarrow \chi = 0,658(\lambda_0)^2 \quad \lambda_0 > 1,5 \rightarrow \chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \quad N_e \leq \begin{cases} N_{ex} \\ N_{ey} \\ N_{ez} \end{cases}$ | | |
| N_e | 2137,19 | kN |
| λ_0 | 1,000 | |
| χ | 0,658 | |
| Instabilidade local | | |
| <i>Mesas (AL)</i> | | |
| $\left(\frac{b}{t}\right) = \frac{b_f}{2 t_f} \rightarrow \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 0,64 \sqrt{\frac{E}{(f_y / k_c)}} \quad 0,35 \leq k_c = \frac{4}{\sqrt{h / t_w}} \leq 0,76$ | | |
| $\left(\frac{b}{t}\right) \leq \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} \rightarrow b_{ef} = b \rightarrow A_{ef} = A_g$ | | |
| $\left(\frac{b}{t}\right) > \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} \rightarrow \begin{cases} \left(\frac{b}{t}\right) \leq \frac{\left(\frac{b}{t}\right)_{lim}}{\sqrt{\chi}} \rightarrow b_{ef} = b \\ \left(\frac{b}{t}\right) > \frac{\left(\frac{b}{t}\right)_{lim}}{\sqrt{\chi}} \rightarrow b_{ef} = b \left(1 - C_1 \sqrt{\frac{\sigma_{el}}{\chi f_y}}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{el}}{\chi f_y}} \end{cases}$ | | |
| $\sigma_{el} = \left(C_2 \frac{\left(\frac{b}{t}\right)_{lim}}{\left(\frac{b}{t}\right)} \right) f_y$ | | |
| $\text{Elemento AL} \rightarrow \begin{cases} C_1 = 0,22 \\ C_2 = 1,49 \end{cases}$ | | |
| b/t | 18,75 | |
| $(b/t)_{lim}$ | 11,09 | |
| $((b/t)_{lim})/\sqrt{\chi}$ | 13,67 | |
| k_c | 0,53 | OK |
| b | 15,00 | cm |
| σ_{el} | 30,85 | kN/cm ² |
| b_{ef} | 12,94 | cm |
| | | OK |

| Alma (AA) | | |
|---|----------------|--------------------|
| $\left(\frac{b}{t}\right) = \frac{d - 2 t_f}{t_w} \rightarrow \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad \left(\frac{b}{t}\right) \leq \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} \rightarrow b_{ef} = b \rightarrow A_{ef} = A_g$ | | |
| $\left(\frac{b}{t}\right) > \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} \rightarrow \begin{cases} \left(\frac{b}{t}\right) \leq \frac{\left(\frac{b}{t}\right)_{lim}}{\sqrt{\chi}} \rightarrow b_{ef} = b \\ \left(\frac{b}{t}\right) > \frac{\left(\frac{b}{t}\right)_{lim}}{\sqrt{\chi}} \rightarrow b_{ef} = b \left(1 - C_1 \sqrt{\frac{\sigma_{el}}{\chi f_y}}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{el}}{\chi f_y}} \end{cases} \quad \sigma_{el} = \left(C_2 \frac{\left(\frac{b}{t}\right)_{lim}}{\left(\frac{b}{t}\right)}\right) f_y$ | | |
| Elemento AA $\rightarrow \begin{cases} C_1 = 0,18 \\ C_2 = 1,31 \end{cases}$ | | |
| b/t | 57,89 | |
| $(b/t)_{lim}$ | 35,62 | |
| $((b/t)_{lim})/\sqrt{\chi}$ | 43,91 | |
| b | 27,50 | cm |
| σ_{el} | 28,21 | kN/cm ² |
| b_{ef} | 24,37 | cm |
| OK | | |
| Área efetiva (Aef) | | |
| $\text{Alma e mesa} \rightarrow \left(\frac{b}{t}\right) \leq \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} \rightarrow A_{ef} = A_g \quad \text{Alma e/ou mesa} \rightarrow \left(\frac{b}{t}\right) > \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} \rightarrow A_{ef} = \sum (b_{ef} t)$ | | |
| A_{ef} | 52,99 | cm ² |
| Verificação dos estados-limites últimos | | |
| Esforço normal resistente de compressão ($N_{c,rd}$) | | |
| $N_{c,Rd} = \frac{\chi A_{ef} f_y}{\gamma_{a1}} \quad N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd}$ | | |
| N_{Rd} | 1109,35 | kN |
| N_{Sd}/N_{Rd} | 9,01% | |
| OK | | |

**APÊNDICE D – Barra de aço submetida à força axial de compressão conforme
prescrições da ABNT NBR 8800:2008**

| BARRA SUBMETIDA À FORÇA AXIAL DE COMPRESSÃO ABNT NBR 8800:2008 | |
|---|--|
| Propriedades mecânicas, perfil, dimensões e propriedades geométricas | |
| <u>Propriedades mecânicas:</u> | |
| Aço estrutural | USI CIVIL 350 |
| Tensão de escoamento (f_y) | 35 kN/cm ² |
| Módulo de elasticidade (E_s) | 20000 kN/cm ² |
| Mód. de elasticidade transv. (G) | 7700 kN/cm ² |
| <u>Perfil:</u> | |
| Soldado | tw = 4,75mm e tf = 8mm |
| <u>Dimensões do perfil:</u> | |
| Altura (d) | 291 mm |
| Altura plana da alma (h) | 275,0 mm |
| Espessura da alma (t_w) | 4,75 mm |
| Largura da mesa (b_f) | 300 mm |
| Espessura da mesa (t_f) | 8 mm |
| <u>Propriedades geométricas:</u> | |
| Posição y do centroide | 145,5 mm |
| Área (A_g) | 61,1 cm ² |
| Massa | 47,9 kg/m |
| Inércia x (I_x) | 10436 cm ⁴ |
| Raio de giração x (r_x) | 13,07 cm |
| Inércia y (I_y) | 3600 cm ⁴ |
| Raio de giração y (r_y) | 7,68 cm |
| Inércia torção (J) | 11 cm ⁴ |
| Coef. Empenamento (C_w) | 720801 cm ⁶ |
| | |
| | d = altura total h_w = altura interna da alma b_f = largura das mesas t_f = espessura das mesas t_w = espessura da alma A_g = área bruta I_x = momento de inércia em relação ao eixo x W_x = módulo de resistência elástico em relação ao eixo x r_x = raio de giração em relação ao eixo x Z_x = módulo de resistência plástico em relação ao eixo x I_y = momento de inércia em relação ao eixo y W_y = módulo de resistência elástico em relação ao eixo y r_y = raio de giração em relação ao eixo y Z_y = módulo de resistência plástico em relação ao eixo y J = constante de torção C_w = constante de empenamento |
| Consideração inicial, comprimentos de flambagem e esforço solicitante de cálculo | |
| <u>Consideração inicial:</u> | |
| Comprimento da barra igual ao teste pelo PR NBR 8800:2022 | 576,65 cm |
| <u>Comprimentos:</u> | |
| Comprimento total da barra | 576,65 cm |
| Comprimento de flambagem equivalente em x (K_xL_x) | 576,65 cm |
| Comprimento de flambagem equivalente em y (K_yL_y) | 576,65 cm |
| Comprimento de flambagem equivalente em z (K_zL_z) | 576,65 cm |
| <u>Esforço solicitante de cálculo:</u> | |
| Normal de compressão solicitante de cálculo (N_{sd}) | 100,00 kN |

| Flambagem local | |
|--|--|
| <i>Mesas (AL)</i> | |
| $\left(\frac{b}{t}\right) = \frac{b_f}{2 t_f} \quad \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 0,64 \sqrt{\frac{E}{(f_y / k_c)}} \quad \left(\frac{b}{t}\right)_{sup} = 1,17 \sqrt{\frac{E}{(f_y / k_c)}}$ | |
| $\left(\frac{b}{t}\right) \leq \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} \rightarrow Q_s = 1,0$ | |
| $\left(\frac{b}{t}\right)_{lim} < \left(\frac{b}{t}\right) \leq \left(\frac{b}{t}\right)_{sup} \rightarrow Q_s = 1,415 - 0,65 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{k_c E}} \quad 0,35 \leq k_c = \frac{4}{\sqrt{h / t_w}} \leq 0,76$ | |
| $\left(\frac{b}{t}\right)_{sup} < \left(\frac{b}{t}\right) \rightarrow Q_s = \frac{0,90 E k_c}{f_y \left(\frac{b}{t}\right)^2}$ | |
| b/t | 18,75 |
| $(b/t)_{lim}$ | 11,09 |
| $(b/t)_{sup}$ | 20,28 |
| k_c | 0,53 OK |
| Q_s | 0,71 |
| <i>Alma (AA)</i> | |
| $\left(\frac{b}{t}\right) = \frac{d - 2 t_f}{t_w} \quad \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ | |
| $\left(\frac{b}{t}\right) \leq \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} \rightarrow Q_a = 1,0$ | |
| $\left(\frac{b}{t}\right)_{lim} < \left(\frac{b}{t}\right) \rightarrow b_{ef} = 1,92 t \sqrt{\frac{E}{f_y}} \left[1 - \frac{0,34}{\left(\frac{b}{t}\right)} \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right] \leq b \rightarrow Q_a = \frac{A_g - \Sigma(b - b_{ef}) t}{A_g}$ | |
| b/t | 57,89 |
| $(b/t)_{lim}$ | 35,62 |
| Q_a | 0,9319 |
| b_{ef} | 18,74 cm OK |
| A_{ef} | 56,90 cm ² |
| <i>Fator de redução total (Q)</i> | |
| $Q = Q_s Q_a$ | |
| Q | 0,66 |
| Instabilidade global | |
| <i>Forças axiais de flambagem elástica (N_{ex}, N_{ey}, N_{ez}, N_e)</i> | |
| $N_{ex} = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x L_x)^2} \quad N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_y)^2} \quad N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + G J \right] \quad r_0 = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2}$ | |
| N_{ex} | 6195,31 kN |
| N_{ey} | 2137,19 kN |
| N_{ez} | 2238,25 kN |
| N_e | 2137,19 kN NÃO HÁ NECESSIDADE EM VERIFICAR, POIS C_w NÃO NULA E (KL)_z <= (KL)_y |
| <i>Esbeltez máxima (λ_{máx})</i> | |
| $\lambda_{max} = \frac{K L}{r} = \pi \sqrt{\frac{A_g E}{N_e}} \leq 200 \quad N_e \leq \begin{cases} N_{ex} \\ N_{ey} \\ N_{ez} \end{cases}$ | |
| λ_{max} | 75,10 OK |

| Verificação dos estados-limites últimos | |
|---|---|
| <i>Força de instabilidade elástica (N_e), índice de esbeltez reduzido (λ_0) e fator de redução associado à resistência à compressão (χ)</i> | |
| $\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_e}} \quad \lambda_0 \leq 1,5 \rightarrow \chi = 0,658(\lambda_0)^2 \quad \lambda_0 > 1,5 \rightarrow \chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2}$ | |
| N_e | <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;">▼</div> <div style="margin-right: 10px;">2137,19</div> <div>kN</div> </div> |
| λ_0 | <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;">▼</div> <div>0,81</div> </div> |
| χ | <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;">▼</div> <div>0,758</div> </div> |
| <i>Esforço normal resistente de compressão ($N_{c,Rd}$)</i> | |
| $N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd}$ | |
| N_{Rd} | <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;">▼</div> <div style="margin-right: 10px;">976,34</div> <div>kN</div> </div> |
| N_{Sd}/N_{Rd} | <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;">▼</div> <div style="margin-right: 10px;">10,24%</div> <div style="margin-left: 20px;">OK</div> </div> |